

النظرية النسبية "العامة والخاصة"

ألبرت أينشتاين

مكتبة الملحدين العرب

مقدمة المؤلف

أتمنى لهذا الكتاب أن يوفر للقارئ الذى يهتم بدراسة نظرية النسبية فلسفيا وعمليا وسيلة سهلة يحقق بها أمله فى دراستها دراسة تامة حتى ولو لم يكن متمكنا من الجهاز الرياضى الذى تتطلبه دراسة الفيزياء النظرية. وعلى الرغم من قلة صفحات هذا الكتاب فإن قراءته تستلزم عزما لايلين ومثابرة على تعمق الفكر ومستوى ثقافيا يضارع مستوى القبول فى الجامعات. ولقد بذلت غاية الجهد فى سبيل توضيح الأفكار الأساسية أحسن إيضاح فوضعتها فى أبسط صورة وأسهلها فهما. أما من حيث التسلسل والإرتباط فقد تركتها فى مجموعها على سجيتها مثلما خطرت لى أصلا. ولم أدخر وسعاً فى سبيل الوضوح الكامل فلم أسلم فى كثير من المواقف من التكرار ولم أهتم أى أهتمام ببلاغة الأسلوب وطلاوته فإنى مثل ل. بولتزمان - ذلك العالم الفذ - أعتقد أن أمور التألق يجب تركها للترزى والإسكاف. ولست أدعى أنى قد باعدت بين القارئ والصعوبات المتصلة بالموضوع إنما قصدت إلى معالجة الأساس الفيزيائى التجريبى للنظرية بطريقة حانية عمادها التيسير والرفق حتى لا أترك القارئ الذى لا يلم بالفيزياء يشعر بالتيه أو بالضياع كمن أضلته الأشجار عن الغابة. إنى أتمنى أن يهيئ هذا الكتاب للقراء لحظات من التفكير الملهم.

ديسمبر ١٩١٦   أ. أينشتين

تعليق بمناسبة الطبعة الخامسة عشر

لقد أضفت في هذه الطبعة الخامسة عشرة ملحقا خامسا يتضمن آرائي في مشكلة المكان عموما والتغيرات التدريجية التي طرأت على تصورنا له نتيجة لوجهة النظر « النسبية » لقد أردت أن أوضح أن المكان ليس بالضرورة شيئا يمكن أن نمنحه وجودا منفصلا بطريقة مستقلة عن الأجسام الموجودة فعلا في دنيا المادة . إن الأجسام المادية ليست «في المكان» بل هي « امتداد مكاني » وبهذه الطريقة يفقد «تصور المكان الفارغ» معناه .

٩ يونيو سنة ١٩٥٢   أ. أينشتين

الجزء الأول

نظرية النسبية الخاصة



الفصل الأول

المعنى الفيزيائي للقضايا الهندسية

لعل الغالبيــة الكبرى ممن يقرءون هذا الكتاب قد تعرفــوا فى حياتهم الدراسيــة على ما فى هندســة إقليدس من منطق نبيل ولــعلهم يذكرون - احتراماً لا حباً - ذلك الصرح الشامخ الذى ساقهم فى تسلق درجة أساتذة أمناء مهرة طوال ساعات لا حـصر لها . ولاشك أن القارئ سينظر بعين الريبة والازدراء إلى كل من يجرؤ على التشكيك فـى صدق أية قضية من قضايا الهندسة ونظرياتها مـهما كانت ثانوية . ولاشك أن الـسر فى ذلك هو ما تولد فى نفس القارئ خـلال تجربته السابقة مع الهندســة من شعور وطيد بالثـقة . ولكن . . . أليس لهـذه الثقة حـدود . . . ؟ لو أن أحد سألك أيها القارئ العزيز : ماذا تعنى بتـأكيدك أن هذه القضايا صادقة ؟ لعلك لو تأملت قليـلا مضمـون هذا السؤال والآفاق التى يفـتحهـا أمامنا لرأيت أركان هذه الـثقة الكاملة قـد اهتزت واكـتنفتهـا الظلال . ولذلك أعتقد أنه لابد لنا أن نتأمل هذا الأمر معا بإمعان وروية .

إن الهندســة تنبع من تصورات مـعينة مثـل تصور المسـتوى والنقطة والمستقيم . ونحن نستطيع أن نربط بهذه التصورات أفكاراً محددة نوعا ما

نتمـثلها جيـدا . والهندسة تقـوم بجانب ذلك على قضـايا بسيطة مـعينة «بديهـيات» ونحن نميل بسـبب حسـن تصورنا لتلك الأفكار المحـددة إلى التسليم بأن هذه البديهيات صادقة . ثم بطريقـة منطقية دامغة لاسبيل إلى إنكار وجـاهتهـا نقيم الدليل علـى أن كل القضـايا الباقـية تتـسلسل من البديهيات ، أى أننا نقيم بذلك البرهان عليها . ومن هنا نرى أن قضايا الهندسة تكون صحـيحة صادقة) عندمـا تكون مشتقة من البـديهيات على النحو المسـلم به . وهكذا نجد أن البحـث فى «صدق» القضـية الهندسـية الواحدة يتحول فى آخر الأمر إلى البـحث فى «صدق البديهيات» . ولكنا قد عرفنا منذ أمـد بعيد أن البحث فى صـدق البديهيات لا يمكن معـالجته بالطرق الهندسية بل إنه لا معنى له بالكلية فـلا وجه لأن نتساءل مثلا إن كان صدقـاً أنه لا يوجد إلا خط مستقـيم واحد يصل بين نقطتين أم لا . كل ما يمكن أن نقوله هو أن هندسة إقيلدس تعالج أشياء تسميها «خطوطا مستـقيمة» وتنسب لأى واحد منهـا خاصية التعين بذاته بـنقطتين واقعتين عليه : ونحن نعلم أن التـصور الذى نعبر عنه بكلمة «صـادق» نقصد به عادة شئ له وجود حـقيقى . (والهندسة ليـست معنية بعلاقـات المفاهيم الداخلة فيها بالأشيـاء الواقعية ولكنها معنية فقط بالـصلات المنطقية لهذه المفاهيم فيما بينها .

وليس من العسـير أن نرى لماذا كنا على الرغم من هذا مـسوقين إلى القول «بصحة» القضايا الهندسية . فـالمفاهيم الهندسية تناظر إن كثيرا أو قليـلا أشياء بالـذات لها وجود فـى الطبيـعة ، وهذه الأشيـاء دون ريب

السبب الوحيد فى نشأة هذه المفاهيم . ولاشك أنه يجب على الهندسة أن تتنكب هذا الطريق إذا أرادت أن يكون لبنائها أكبر وحدة منطقية ممكنة . خذ مثلا تلك العادة المتأصلة فى تفكيرنا فى أن كل ما فى المسافة هو موضع نقطتين على جسم متماسك . أو أيضا ما درجنا عليه من اعتبار ثلاث نقط على استقامة واحدة إذا استطعنا أن نجعل مواضعها الظاهرية تنطبق على مسار شعاع بصرى واحد ، وذلك إذا أحسنا اختيار الموضع الذى نرصد منه هذه النقط الثلاث .

ولكنا نستطيع أن نستعيد ثقتنا الأولى إلى حد ما وذلك إذا أضفنا إلى قضايا هندسة إقليدس القضية التالية : «تناظر نقطتان على جسم جاسئ نفس المسافة دائماً (الفترة الخطية) مهما حدث من تغييرات فى موضع الجسم » عند ذلك نجد أن قضايا هندسة إقليدس تتحول فجأة إلى قضايا عن المواضع النسبية الممكنة للأجسام الجاسئة[١] . والهندسة التى أكملت بهذه الصورة يجب أن تعالج على اعتبارها فرعا من الفيزياء[٢] .

(١) يتبع هذا أن يرتبط جسم طبيعى بخط مستقيم وهكذا تقع النقط أ ، ب ، جـ على جسم جاسىء على خط مستقيم حينما نختار النقطة ب وقد حددنا من قبل النقطتين أ ، جـ بحيث يكون مجموع المسافتين أ ب ، ب جـ أقصر ما يكون . وسيفى هذا الاقتراح الناقص بالغرض الذى ننشده حاليا .

(٢) هذا هو ما يسمى بفيزياء الهندسة وهو حجر الزاوية الذى شاد عليه ريمان هندسة الفضاء الكروى المنحنى مترسما خطى لوباتشفسكى أبو الهندسات اللاإقليدية وجاوس الذى اهتدى إلى الوسيلة الرياضية العامة لدراسة المتصلات متعددة الأبعاد . وإذا =

ويحق لنا عندئذ أن نتساءل عن صدق قضايا الهندسة مفسرة على هذا النحو . لأننا أصبحنا نستطيع أن نختبر هل تتفق فعلا هذه القضايا مع الأشياء الحقيقية التى ربطناها فيما سبق بالأفكار الهندسية أم لا . أو بعبارة أخرى - ولو أنها أقل دقة - يمكننا أن نعبر عن ذلك بأن نقول إننا نقصد بصدق قضية هندسية ما بهذا المعنى قابليتها للتنفيذ باستعمال المسطرة والفرجار .

وهكذا نرى بوضوح أن الاقتناع بصدق القضايا الهندسية بهذا المعنى يستند كلية على تجربة لا يمكن اعتبارها بحال من الأحوال كاملة بل هى أقرب ما تكون إلى النقص ولكننا مع ذلك سنسلم الآن بصدق القضايا الهندسية وسنرى فيما بعد (فى نظرية النسبية العامة) أن هذا الصدق محدود ، وسنحاول أن نعين مدى هذه الحدود .

= اضفنا إلى هذه الأفكار فكرة تساوى الكتلة القصورية والكتلة الجاذبية حصلنا على هيكل نظرية النسبية العامة (المترجم) .

الفصل الثانى

مجموعة الإحداثيات

لقد شرحنا فى الفصل السابق التفسير الفيزيائى للمسافة واستناداً إلى هذا التفسير نستطيع أن نحـدد بسهولة المسافة التى تفصل بين نقطتين على جسم جاسىء وذلك بوساطة القياس . وكل ما نحـتاج إليه للقيام بعملية القيـاس هو «مسافـة ما» ولتكن «القـضيب ل مثـلا» نتفق عليـها مقـدماً ونعتـبرها وحـدة عيـارية للقياس فـإذا كانت أ ، ب نقطتين عـلى جسم جاسىء فـإننا نستطيع إنشاء الخط الذى يـوصل بينهما بالطرق الهندسـية ونسـتطيع ابتداء من أ أن نطبق الـقضـيب على هذا الخط وأن نكرر ذلك بحيث تطابق نقطة ابتدائه فى كل مرة نهايته فى المرة السابقة إلى أن نصل إلى ب، وعدد مرات تكرار هذه العملية هو القياس العددى للمسافة أ ب. إن هذا هو أساس كل عمليات قياس الأطوال[1].

إن كل وصف لمسرح أية حادثة أو لموضع جسم ما فى الفضاء يستند

(١) لقد فرضنا هنا أنه لم يتبق شىء أى نتيجة القياس عدد صحيح ونحن نتغلب على هذه المشكلة أيضا باستعمال قـضبان القيـاس المقسمة إلى أجـزاء واستعمـالها على هذه الصورة لا يتطلب تعديلا جوهريا فى طريقة القياس .

أساساً إلى تعيين النقطة التى تناظر مسرح الحادثة أو موضع الجسم من نقط مجموعة الإسناد . وليس هذا النحو فى وصف مسارح الحوادث ومواضع الأجسام وقفاً على العلم وحده بل إنه فى الواقع عين ما نلجأ إليه فى حياتنا اليومية . إننا إذا تأملنا تحليلياً التحديد المكانى : «حادثة فى ميدان التحرير بالقاهرة مثلا» أمكن أن نصل بسهولة إلى النتيجة التالية : إن الأرض هى مجموعة الإسناد التى تسند إليها التعيين المكانى ، وميدان التحرير نقطة محددة جيداً على سطح الأرض أطلق عليها هذا الاسم وهذه النقطة هى النقطة التى تتفق ومسرح الحادثة فى المكان[١] .

وهذه الطريقة البدائية فى تعيين المكان لا تصلح إلا بالنسبة للأماكن التى تقع على سطوح الأجسام الجاسئة وبشرط وجود نقط على هذه الأجسام يمكن تمييزها عن غيرها من النقط . ولكنا نستطيع أن نتحرر من كل هذه القيود دون أن نغير الأساس الذى نعتمد عليه فى تعيين المواضع . فإذا كانت هناك سحابة فوق ميدان التحرير مثلا فإننا نستطيع أن نعين مكانها بالنسبة إلى سطح الأرض بأن نقيم عموداً يصل بينها وبين الميدان وطول هذا العمود مقيساً بقضيب القياس العيارى مشتركا مع ما يحدد نقطة قاعدة العمود يعطيانا معاً تحديداً كاملا لموضع السحابة فى الفضاء . ومن هذا المثل نرى بوضوح الطريقة التى تم بها تهذيب الفكرة

(١) ليس من الضرورى هنا أن نتقصى إلى أبعد من ذلك معنى عبارة الاتفاق فى المكان فهذا التصور واضح الوضوح الكافى لتجنب اختلاف الرأى حول امكان تطبيقه عمليا .

الأساسية فى عملية تحديد المواضع عموماً . وتتلخص خطوات هذه العملية فيمايلى :

(أ) أن نتخيل الجسم الجاسىء الذى نسند إليه التعيين المكانى مزوداً على نحو يمكنه من الوصول إلى الجسم المراد تعيين موضعه .

(ب) نستعمل فى تحديد موضع الجسم عدداً بدلا من الالتجاء إلى نقط إسناد معينة (وهو فى هذه الحالة طول العمود مقيساً بقضيب القياس «وحدة القياس») .

(جـ) نستطيع أن نحصل على ارتفاع السحابة حتى ولو لم نقم العمود فعلا فنحن إذا رصدنا السحابة ضوئياً من مواقع مختلفة على الأرض. وإذا أدخلنا فى حسابنا خواص انتشار الضوء نستطيع أن نعين طول العمود الذى كان علينا أن نقيمه حتى نصل إلى السحابة .

مما تقدم نرى أنه سيكون من المستحسن لو أمكن عند وصف المواقع عموماً أن نتحرر بطريقة القياسات العددية من ضرورة الالتجاء إلى ذكر مواقع معينة لها أسماء خاصة تتميز بها على مجموعة الإسناد التى نرجع إليها . ونحن نحقق ذلك فى القياسات الفيزيائية بتطبيق مجموعة إحداثيات **ديكارت** .

وهى تتكون من ثلاثة سطوح مستوية متعامدة ومرتبطة ارتباطا جاسئا بجسم جاسىء . وبتحديد موقع أية حادثة إذا أسندناه إلى مجموعة الإسناد بتعيين أطوال ثلاثة الأعمدة أو الإحداثيات (س. ص. ع) التى

يمكن إسقاطهـا من مسرح الحادثة على ثلاثة السطوح المستوية التى تكون مجموعة الإسناد . وأطوال هذه الأعـمدة الثلاثة يمكن تحديدها بسلسلة من عمليات القياس تتم باستعمال قضبان القياس تبـعاً للقواعد والطرق التى وضعتها هندسة إقليدس .

وليس من المستطاع دائماً فى الحياة العملية الحصـول على السطوح الجاسئة التى تتكون منهـا مجـموعة الإسناد ، وفـوق ذلك فإن مـقادير الإحداثيات لاتحدد عملياً بطريق القياس المباشر بقضبان القياس فقط ولكن بطرق غيـر مباشرة أيضـا ، فإذا كنا نريد أن تحتفـظ النتائج التى توصلنا إليها فى الفيزياء والفلك بوضوحها يجب أن لا يغيب عن بالنا أن تعيين المواقع يفقد معناه الفيزيائى مالم يخضع للاعتبارات التى ذكرناها آنفاً[١] .

وهكذا نصل إلى النتيـجة التاليـة : إن وصف الحوادث التى تتم فى الفضاء يحتم علينا الالتـجاء إلى مجموعة إسناد جاسـئة ننسب إليها هذه الحوادث ، والعلاقة الناتجة تسلم جدلا بأن قوانين الهندسة الإقليدية تنطبق على المسافات باعتبار المسافة يمثلهـا فيزيائياً اتفاق سابق على علامتين على جسم جاسىء .

---

(١) لا يصبح اكمـال وتحوير هذا الاعتبار ضـروريا إلى أن نعالج نظرية النسبيـة العامة التى سنناقشها فى الجزء الثانى من هذا الكتاب .

الفصل الثالث

المكان والزمان فى الميكانيكا الكلاسيكية

«إن الميكانيكا تهدف إلى وصف كيفية تغيير الأجسام لمواقعها فى المكان بمرور الزمن» . لاشك أنى لو ألقيت مثل هذا القول على علاته دون تفكير جدى وإيضاحات مفصلة عن أهداف الميكانيكا أكون قد أثقلت ضميرى بآثام جسام ضد روح الوضوح المقدسة .

والآن دعنا نكشف الغطاء عن هذه الآثام وأولها هو عدم وضوح ما نقصده هنا بكلمتى «الموقع» و«المكان» . فإذا فرضنا أنى أقف بنافذة عربة قطار يسير بسرعة انتقال منتظمة وأنى أسقطت حجراً على طريق السكة الحديدية دون أن أقذف به فإنى إذا تغاضيت عن أثر مقاومة الهواء أجد أن هذا الحجر يظهر بالنسبة لى كأنه يسقط فى خط مستقيم بينما يراه رجل واقف على جانب الطريق يسقط إلى الأرض فى منحنى يسمى قطع مكافىء . وإنى أتساءل الآن هل تقع النقط التى مر بها الحجر « فى الحقيقة» على خط مستقيم أو على منحنى قطع مكافىء ؟ وفوق ذلك ماذا نقصد هنا بعبارة الحركة «فى المكان» . . . ؟ إننا فى ضوء الاعتبارات التى قدمناها فى الفصل السابق نجد أن الجواب على هذا السؤال واضح

للعيان والسبيل إليه هو أن نحذف أولا وقبل كل شيء تلك الكلمة الغامضة «المكان» التي تقتضي الأمانة أن نعترف بأننا لا نستطيع أن نكون عنها أدنى فكرة ، ثم نحل محلها عبارة «الحركة بالنسبة إلى مجموعة إسناد جاسئة» . أما المواقع بالنسبة إلى مجموعة الإسناد (عربة القطار أو قضيب السكة الحديدية) فقد سبق لنا تعريفها تفصيلا في الفصل السابق فإذا وضعنا بدلا من عبارة «مجموعة الإسناد» عبارة «مجموعة الإحداثيات» وهي فكرة رائعة يمكن الاعتماد عليها في الوصف الرياضي - نجد أننا قد أصبحنا في موقف يؤهلنا لأن نقول : «إن الحجر يقطع عند سقوطه خطاً مستقيما بالنسبة إلى مجموعة إسناد مرتبطة ارتباطاً جاسئا بعربة القطار ولكنه بالنسبة إلى مجموعة إسناد مرتبطة ارتباطاً جاسئا بالأرض قضيب السكة الحديدية) يقطع قطعاً مكافئاً «ونحن نرى بوضوح بفضل هذا المثل أنه لا وجود لشيء مثل «مسار مستقل الوجود» (حرفياً منحنى المسار[1] » إنما كل ما هناك هو مجرد مسار نسبي بالنسبة إلى مجموعة إسناد خاصة .

ولكي يكون وصفنا للحركة كاملا يجب أن نعين كيف يغير الجسم موقعة بمرور الزمن . أي أننا يجب أن نذكر بالنسبة إلى كل نقطة على المسار وقت وجود الجسم بهذه النقطة . وحتى هذه المدلولات لا تكفي لأن تجعل وصفنا للحركة كاملا إنما يجب أن يضاف إليها تعريف للزمن يجعل من المستطاع اعتبارها - وهي قيم زمانية أصلا - مقادير (نتائج

---

(١) أي المنحنى الذي يتحرك عليه الجسم .

للقيـاس) يمكن معرفـتها عن طريق الملاحـظة وفى حالة المثل التوضـيحى السابق نصل إلى تحقيق هذا الهدف - على أساس الميكانيكا الكلاسيكية - بأن نتصور أن هناك ساعتين متشـابهتين فى التركيب إحداهما مع الراصد الذى يطل من نافذة القطار والأخرى مع الراصد الذى على جانب الطريق الحديدى وأن نطلب إليهما أن يحدد كل منهـما موضع الحجر بالنسبة إلى مجموعة إسناد كل منهما فى كل لحظـة تعينها الساعة . ونحن نتجاوز فى هذا عن الخطأ الذى يترتب على سرعة انتـشار الضوء المحددة . وسنتكلم بالتفصيل عن ذلك وعن صعوبة أخرى قائمة هنا فى فصول تالية .

الفصل الرابع

مجموعة الإحداثيات الجليلية

كلنا نعلم جيداً أننا نستطيع لو شئنا أن نضع القانون الأساسى لميكانيكا جاليليو - نيوتن وهو المعروف بقانون القصور الذاتى على النحو الآتى : « كل جسم معزول بدرجة كافية عن بقية الأجسام يستمر ساكناً أو متحركاً بحركة منتظمة فى خط مستقيم» . وهذا القانون لا يدلنا إلى حد ما على حركة الأجسام فحسب بل إنه يشير أيضاً إلى مجموعات الإسناد أو مجموعات الإحداثيات الممكنة فى الميكانيكا والتى يمكن الالتجاء إليها عند الوصف الميكانيكى . فالنجوم الثابتة التى يمكن رؤيتها أجسام معزولة بدرجة كافية ، ويمكن أن يطبق عليها قانون القصور الذاتى إلى درجة عالية من التقريب . ولكننا إذا استعملنا مجموعة إحداثيات مرتبطة بالأرض ارتباطاً جاسئاً نجد أن كل نجم ثابت يتحرك بالنسبة إلى هذه المجموعات فى دائرة هائلة القطر خلال يوم فلكى وهذا يجعل هذه المجموعات تتعارض مع نص قانون القصور الذاتى ولذلك إذا أردنا التمسك بهذا القانون وجب علينا قصر إسناد الحركات عموما على مجموعات الإحداثيات التى تكون حالتها من الحركة بحيث ينطبق عليها

قانون القصور الذاتي وتسمى «مجموعة إحداثيات جاليلية » ولا تعتبر قوانين ميكانيكا **جاليليو - نيوتن** صحيحة إلا بالنسبة إلى مجموعات الإحداثيات الجاليلية هذه فقط .

الفصل الخامس

مبدأ النسبية (بالمعنى المقيد)

ذ

دعنا نعود تلمساً لأقصى وضوح ممكن إلى مثل عربة القطار التى تتحرك بسرعة منتظمة . إننا نسمى حركتها انتقالا منتظماً (منتظماً لأن سرعته واتجاهه ثابتان وانتقالا لأنه بالرغم من أن العربة تغير موضعها بالنسبة إلى قضيب السكة الحديدية فإنها مع ذلك لا تدور أثناء حركتها) ولنفرض الآن أن غراباً يطير بحيث تبدو حركته لمن يرقبها من فوق قضيب السكة الحديدية منتظمة وفى خط مستقيم . إننا إذا كان علينا أن نرصد نفس الغراب الطائر ونراقبه من عربة القطار المتحركة لوجدنا أن حركته سوف تبدو مختلفة السرعة والاتجاه عنها فى الحالة الأولى ولكنها ستظل مع ذلك منتظمة وفى خط مستقيم . ولهذا يمكن أن نقول على وجه التجريد «إذا كانت الكتلة ك تتحرك بانتظام فى خط مستقيم بالنسبة إلى مجموعة الإسناد م فإنها تكون أيضا متحركة بحركة منتظمة وفى خط مستقيم بالنسبة إلى مجموعة إسناد أخرى مَ مادامت مجموعة الإسناد الأخيرة تتحرك بحركة انتقال منتظمة بالنسبة إلى المجموعة م » وتبعاً لما ذكرنا فى الفصل السابق ترى أنه :

إذا كانت م مجموعة إسناد جاليليلة فإن كل مجموعة إسناد أخرى مَ تكون جاليلية أيضاً عندما تكون فى حالة حركة انتقال منتظمة بالنسبة إلى المجموعة م فتكون قوانين ميكانيكا **جاليليو - نيوتن** صحيحة بالنسبة إلى المجموعة مَ مثل ما هى صحيحة بالنسبة إلى مجموعة الإسناد م .

والآن دعنا نتقدم خطوة أخرى فى تعميمنا فنعبر عن المبدأ على هذا النحو : « إذا كانت مَ مجموعة إسناد تتحرك بحركة منتظمة خالية من الدوران بالنسبة إلى م فإن كل الظواهر الطبيعية بالنسبة إلى مَ تخضع لنفس القوانين الطبيعية العامة التى تخضع لها فى م » ويسمى هذا النص «مبدأ النسبية» (بالمعنى المقيد) .

وعندما كنا مقتنعين بأن كل الظواهر الطبيعية يمكن تمثيلها بمساعدة قوانين الميكانيكا الكلاسيكية لم يكن هناك داع إلى الشك فى صحة مبدأ النسبية ، ولكنه ظهر شيئاً فشيئاً مع تقدم الديناميكا الكهربائية وعلم البصريات أن الميكانيكا الكلاسيكية لم تعد تقدم أساساً كافياً لوصف كل الظواهر الطبيعية ، وعند ذلك قفز السؤال عن صلاحية مبدأ النسبية وصحته إلى مسرح المناقشة ، ولم يستبعد فى ذلك الحين أن تكون الإجابة عليه بالنفى .

ومع ذلك فهناك حقيقتان عامتان ضخمتان تؤيدان تأييداً واضحاً صدق مبدأ النسبية . فالميكانيكا الكلاسيكية بالرغم من أنها أصبحت لا تمدنا بأساس شامل يكفى لأن يفسر نظرياً كل الظواهر الطبيعية فإننا لا

نستطيع أن ننكر عليها قدراً عظيما من «الصدق» حيث إنها تفسر لنا تفسيراً يبلغ حد الروعة فى دقته حركات الأجرام السماوية وعلى ذلك يجب أن يصدق مبدأ النسبية بدقة عظيمة فى مجال الميكانيكا أيضاً . أما أن يصدق بهذه الدقة العظيمة مبدأ عام كهذا فى مجال من مجالات الظواهر وأن يكبو فى غيرهم فأمر يكاد يكون بديهياً أنه غير محتمل .

أما الحجة الأخرى ولو أننا سنعود إليها فيما بعد فتتلخص فى أنه إذا كان مبدأ النسبية (بالمعنى المقيد) خطأ فإن مجموعات الإسناد الجاليلية م ، مَ ، مً . . . إلخ التى تتحرك بحركة منتظمة بالنسبة لبعضها البعض لن تكون متكافئة من حيث ملاءمتها لوصف الظواهر الطبيعية وفى هذه الحالة سنجد أنفسنا محمولين على الاعتقاد بأن القوانين الطبيعية لا يمكن التعبير عنها بطريقة سهلة إلا فى حالة خاصة واحدة وذلك عندما نكون قد اخترنا كمجموعة إسناد لنا من بين كل مجموعات الإحداثيات الجاليلية مجموعة واحدة م لها حالة خاصة من الحركة، وسيحق لنا عندئذ (وذلك بسبب مزايا هذه المجموعة من حيث الملائمة في وصف الظواهر الطبيعية) أن نسمي هذه المجموعة م فى حالة «سكون مطلق» وكل المجموعات الجاليلية الأخرى مَ حالة «حركة» . فإذا كان طريق السكة الحديدية مثلا يناظر المجموعة م فإن عربة القطار تناظر المجموعة مَ وتكون القوانين الخاصة بالمجموعة الأولى م أبسط من قوانين المجموعة الثانية مَ . وهذا التعقيد فى قوانين المجموعة الثانية مرجعه أن العربة تتحرك « فى الحقيقة

بالنسبة إلى م وسيتدخل مقدار واتجاه سرعة العربة فى تحديد القوانين الطبيعية العامة بالنسبة إلى مجموعة الإسناد مَ . لذلك كان علينا أن نتوقع مثلا أن تختلف نغمة صادرة عن أنبوبة أرغن محورها فى اتجاه حركة العربة عن نغمة صادرة من نفس أنبوبة الإرغن عندما يكون محورها فى اتجاه عمودى على اتجاه حركة العربة . ولما كانت الأرض بسبب حركتها فى مدارها حول الشمس تشبه عربة قطار تتحرك بسرعة ٣٠ ك م فى الثانية فعلينا إذا أن نتوقع إذا كان مبدأ النسبية غير صحيح أن يتدخل إتجاه حركة الأرض فى تكييف القوانين الطبيعية ، وكذلك سوف يعتمد سلوك المجموعات الفيزيائية على اتجاهها فى الفضاء بالنسبة للأرض لإنه لما كان اتجاه سرعة الأرض فى دورانها يتغير خلال العام فإنها لا يمكن أن تكون فى حالة سكون بالنسبة إلى مجموعة الإسناد م خلال العام كله . ولكنه لم يحدث أبداً أن كشفت الملاحظة الدقيقة عن أى تأثير أو تدخل للاتجاهات فى تحديد القوانين الطبيعية فى الفضاء الأرضى ، أى أننا لم نجد أى اختلاف أو فارق بين خواص الإتجاهات المختلفة فى الفضاء لأنها كلها متكافئة وهذا تأييد قوى لمبدأ النسبية .

الفصل السادس
نظرية تركيب السرعات المستعملة
فى الميكانيكا الكلاسيكية

تخيل أيها القارئ العزيز عربة القطار تتحرك على القضبان بسرعة قدرها ع وتخيل رجلا يعبر العربة طولا فى اتجاه سير القطار بسرعة قدرها عَ فبأية سرعة يتحرك هذا الرجل بالنسبة إلى قضبان السكة الحديدية .... ؟ إذا ظل الرجل ساكنا فى العربة مدة ثانية فإنه يقطع فى هذه الثانية مسافة قدرها ع مساوية عدديا لسرعة العربة ولكنه فى الواقع نظراً لسيره فى العربة يقطع فى هذه الثانية مسافة إضافية قدرها عَ بالنسبة للعربة وبالتالى بالنسبة للقضبان أيضاً وتساوى عدديا سرعة سيره . وهكذا يكون مجموع ما يقطعه فى الثانية بالنسبة إلى القضبان هو س = ع + عَ وسنرى فيمايلى أن هذه النظرية وتسمى فى الميكانيكا الكلاسيكية نظرية تركيب السرعات لا يمكن الاحتفاظ بها ، أى أن القانون الذى ذكرناه آنفا لا يمثل الحقيقة ولو أننا سنسلم الآن بصحته إلى حين .

الفصل السابع

التناقض الظاهرى

بين قانون انتشار الضوء ومبدأ النسبية

يصعب أن نجد فى الفيزياء قـانوناً أبسط من قانون انتشار الضوء فى الفـراغ ؛ فكل أطفال المدارس يعـرفـون أو يظنون أنهم يعرفـون أن هذا الانتشـار يحدث فـى خـط مـستقـيم بسرعـة قدرها ٣٠٠,٠٠٠ ك م فى الثانية . ونحن نعـرف على أية حال بمنتهى الدقة أن هذه السـرعة واحدة بالنسبة لكل الألوان ، لأنه لو لم يكن الأمـر كذلك لما استطعنا رؤية أقل ومضة من نجم ثابت بالنسـبة للألوان المختلفة متـزامنة وذلك أثناء كسوف ذلك النجم بوساطة جاره المظلم . ولقد استطاع الفلكى الهولندى دى ستر استناداً إلى اعـتبـارات مماثلة قائمة على دراسـة النجوم المزدوجـة أن يثبت أيضاً أن سـرعة انتـقال الضـوء لا تتأثر بحـركة المصدر الذى يـصدر منه والزعم ، القائل بأن سرعة انتشار الضوء تعتمد على اتجاهه « فى الفضاء» زعم فى حد ذاته غير محتمل .

إننا باختصار مدعوون إلى أن نسلم مع أطفال المدارس بقانون ثبوت سرعـة انتشار الضوء (فى الفـراغ) جـ . من كان يتخـيل أن هذا القانون

البسيط قد أوقع علماء الفيزياء أمناء التفكير فى أكبر المآزق الفكرية ...!
دعنا نرى الآن كيف كان ذلك .

إننا نعلم جميعاً أنه يجب علينا أن نسند عملية انتشار الضوء (وكذلك كل عملية أخرى فى الواقع) إلى مجموعة إسناد جاسئة (مجموعة إحداثيات) وليكن طريق السكة الحديدية الذى يمكن أن نتصوره فى فراغ تام فإذا أرسلنا شعاعاً ضوئياً على طول الطريق فإن رأس هذا الشعاع يتحرك بالسرعة حـ بالنسبة للطريق ولكننا إذا تخيلنا عربة القطار تسير بسرعة ثابتة على الطريق قدرها ع فى نفس اتجاه شعاع الضوء فماذا تكون سرعة انتشار الضوء بالنسبة إلى عربة القطار .... ؟ من الواضح أننا نستطيع هنا أن نطبق النظرية التى شرحناها فى الفصل السابق حيث يلعب شعاع الضوء دور الرجل بالنسبة إلى عربة القطار ونستبدل السرعة ع وهى سرعة الرجل بالنسبة إلى الطريق بسرعة الضوء بالنسبة إلى الطريقة وتكون س هى السرعة المطلوبة وهى سرعة الضوء بالنسبة إلى العربة وعلى ذلك يكون لدينا :

س = حـ - ع

وهكذا يكون انتشار الضوء بالنسبة للعربة أقل من حـ

ولكن هذه النتيجة تناقض مبدأ النسبية الذى أوضحناه فى الفصل الخامس والذى ينص على أن قانون انتشار الضوء فى الفراغ ككل قانون طبيعى آخر يجب أن يظل واحدا سواء كانت مجموعة الإسناد هى طريق

السكة الحديدية أو العربة . ولقد رأينا أن هذا يبدو مستحيلا فى ضوء ما تقدم لأنه إذا كانت سرعة انتشار الضوء بالنسبة إلى طريق السكة الحديدية هى حـ فإنه تبعاً لما تقدم يجب أن يكون هناك قانون آخر لسرعة انتشار الضوء بالنسبة إلى العربة وهذه هى نقطة الخلاف مع مبدأ النسبية .

وأمام هذه المشكلة لم يكن هناك بد من الاستغناء عن واحد منهما : مبدأ النسبية أو قانون انتشار الضوء فى الفراغ والقراء الذين تتبعوا جيداً الفصول السابقة يتوقعون بالتأكيد أننا سنقف فى صف النسبية وذلك لأنه شديد الإقناع ، غاية فى البساطة وطبيعى جداً وفى هذه الحالة يجب استبدال قانون انتشار الضوء فى الفراغ بقانون آخر أكثر تعقيداً ولكنه يتفق ومبدأ النسبية . ولكن تقدم الفيزياء النظرية قد أوضح بجلاء أن هذا التعديل أمر غير مستطاع فقد أثبتت الأبحاث النظرية التى كان لها أثر بالغ والتى أجراها **هـ. أ. لورنتز** على الظواهر الديناميكية الكهربية والظواهر الضوئية المتعلقة بالأجسام المتحركة أن التجربة فى هذا المضمار تؤيد تماماً تفسيراً للظواهر الكهرومغناطيسية يستلزم الاحتفاظ بقانون ثبوت سرعة الضوء فى الفراغ . وهنا احتدام الصراع بين الرأيين . وقد مال فزيائيون كبار عندما وصلنا إلى هذا الوضع إلى التخلى عن مبدأ النسبية بالرغم من أن أحداً لم يتوصل بأية حال من الأحوال إلى نتائج تجريبية تتعارض مع هذا المبدأ .

وفى هذه الأزمة المستحكمة تقدمت نظرية النسبية إلى الحلبة وأدلت

بدلوها وبدا واضحاً عند ذلك تمام الوضوح نتيجة لتحليل تصورات الفيزياء عن المكان والزمان أنه « لا أثر فى الحقيقة لأى تعارض بين مبدأ النسبية وقانون انتشار الضوء » . وإننا بالتمسك بانتظام بكلا هذين القانونين نستطيع الوصول إلى نظرية متماسكة منطقياً . ولقد سميت هذه النظرية بنظرية النسبية الخاصة تمييزاً لها عن النظرية الأوسع التى سنعالجها فى آخر هذا الكتاب . أما فى الصفحات التالية فسنقدم الأفكار الأساسية فى نظرية النسبية الخاصة .

الفصل الثامن
فكرة الزمن فى الفيزياء

هب أن صاعقتين جويتين أصابتا قضبان السكة الحديدية المعهودة فى مكانين ا ، ب متباعدين جداً . وهب فوق ذلك أنى أكدت لك أن هاتين الصاعقتين قد حدثتا في وقت واحد . إنى لو سألتك أيها القارئ العزيز هل هناك أى معنى لهذا القول ؟ لأجبت على الفور بالإيجاب . ولكننى لو طالبتك بأن تشرح لى بإسهاب ودقة معنى هذا الكلام لوجدت بعد قليل من التأمل أن الأمر ليس هيناً كما يبدو لأول وهلة .

وربما خطرت لك بعد قليل هذه الإجابة : «إن معنى هذا الكلام واضح لا يحتاج إلى تفسير وطبيعى أن الأمر سيحتاج إلى بعض التدبر لو كان علىّ أن أقرر عن طريق الملاحظة ما إذا كانت الصاعقتان فى هذه الحالة قد حدثتا في آن واحد أم لا » . ولكنى شخصيا لا يمكن أن أرضى بهذه الإجابة للسبب التالى : هب أن فلكياً ماهراً استطاع أن يكتشف خلال تأملاته العبقرية أن الصاعقة لابد أن تصيب ا ، ب فى وقت واحد ، فعند ذلك سيكون علينا أن نختبر إذا كانت هذه النتيجة النظرية

تتفق والحقيقة ، وعند ذلك ستجابهنا نفس الصعوبة التى تقابلنا فى كل أمور الفيزياء التى تتدخل ، وعند ذلك ستجابهنا نفس الصعوبة التى تقابلنا فى كل أمور الفيزياء التى تتدخل فيها فكرة الآنية أو التزامن . إن هذا التصور لا وجود لها بالنسبة إلى عالم الفيزياء ما لم تتح له فرصة اكتشاف ما إذا كان قد تحقق فعلا أم لا . وهكذا نرى أننا فى احتياج إلى تعريف الآنية وتحديد معناها تعريفا يمدنا بوسيلة نستطيع بها فى الحالة الراهنة أن نقرر تجريبيا هل حدثت الصاعقتان الجويتان فعلا فى وقت واحد أم لا . وطالما لم يتوافر هذا الشرط ولم أحقق هذه النتيجة فإنى أنا عالم الفيزياء (وبالطبع أيضا إن لم أكن عالم فيزياء) أخدع نفسى حينما أتصور أننى أستطيع أن أعطى النص على الآنية أى معنى (فشرط التسليم بوجود الآنية هو إمكان التحقق منها عملياً وإلا فليس هناك آنية)[1] وإنى أسأل القارىء ألا يتابع القراءة ما لم يكن تام الاقتناع بهذه النقطة .

وربما بعد أن تأملت الأمر مليا خطرت لك الفكرة التالية كوسيلة عملية للتحقق من الآنية ألا وهى أن نقيس المسافة بين أ ، ب وأن نضع راصداً فى نقطة الوسط (و) مزوداً بوسيلة ما (مرآتين متعامدتين مثلا) تمكنه من رؤية أ ، ب معا . فإذا رأى مثل هذا الراصد الصاعقتين فى وقت واحد فهما إذا آنيتان .

---

(١) لم ترد هذه العبارة فى الأصل اضفناها للشرح (المترجم) .

ويسرنى جداً أن أوافق على هذا الرأى ولو أنه فى نظرى لا يحسم الموضوع فإنى أشعر أنى ملزم أن أقدم الاعتراض التالى : إن هذا التعريف للآنية صحيح لاشك فى ذلك لو أننى كنت أعلم أن الضوء الذى يرى به الراصد وميض الصاعقة يقطع المسافة (أ و) بنفس السرعة التى تقطع بها المسافة (و ب) ولا نستطيع اختبار صحة هذا الفرض ما لم يكن لدينا وسيلة لقياس الزمن . وهكذا يبدو أننا ندور فى حلقة مفرغة .

وربما بعد تأمل قليل أجبت ساخرا منى ولديك كل العذر قائلا : إننى متمسك بتعريفى السابق للآنية رغم اعتراضك لأن هذا التعريف لا يتعرض فى الواقع للضوء إطلاقاً ، وليس هناك إلا شرط واحد يجب أن يتوافر فى تعريف الآنية لكى يكون صحيحا ألا وهو أنه فى كل حالة واقعية يجب أن يمكننا هذا التعريف من أن نقرر تجريبياً إذا ما كانت الحالة التى نحن بصددها قد تحققت فعلا أم لم تتحقق . وليس هناك مجال للمناقشة فى أن التعريف الذى أقدمه للآنية لاشك يحقق هذا الشرط فكون الضوء يحتاج إلى نفس الزمن لقطع المسافة من (و) إلى (ب) ليس فى الحقيقة تخيلا أو افتراضاً حول طبيعة الزمن الفيزيائية ولكنه مجرد « تعويض » لى مطلق الحرية فى إجرائه لكى أصل إلى تعريف الآنية .

وواضح أن هذا التعـريف يمكن أن يستعـمل ليعطى معنى مـحددا لا لحادثين فقط بل ولأى عدد نختاره مـن الحوادث أيا كانت مواضع مسارح هذه الحوادث بالنسـبة إلى مجمـوعة الإسناد[1] (وهى هنـا طريق السـكة الحديدية) وهذا يقـودنا أيضا إلى تعريف الزمن فى الفيـزياء . ولهذا دعنا نتصـور ساعات مـتمـاثلة التركيب وضـعت فى النقط أ ، ب ، حـ من طريق السكة الحديدية (مجـموعة إحداثيات) بحيث تكون عـقاربها فى آن واحد بالمعنى السابق فى مواضع متماثلة . وفى هذه الظروف نرى أن زمن أية حادثة هو مـا تحدده قراءة موضع عـقارب أية ساعة من السـاعات التى على مقـربة من مكان الحادثة . وبهذه الطريقة نجـمع بين كل حادثة يمكن رصدها ومقدار زمنى بصورة أساسية .

وهذا التعويض يحمل فى طياته فرضـاً فزيائيا آخر مسلماً به يصعب الشك فى صحـته ما لم يثبت تجـريبيا أن العكس هو الصـحيح ذلك هو افتـراضنا أن جميع هذه الساعـات تتحرك بمعدل واحـد مادامت متشـابهة التركيب أو بعـبارة أدق إذا ضبطت ساعتـان فى حالة سكون وفى مكانين

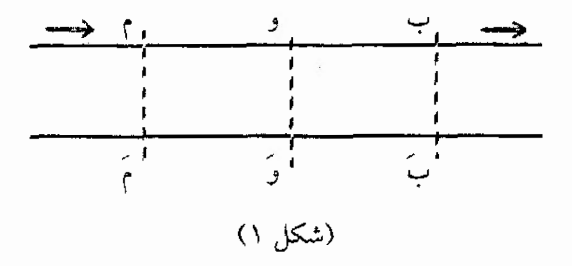
(١) ونحن نفـرض أبعـد من ذلك أنه عندمـا تحدث الحـوادث أ ، ب ، جـ فى أمـاكن مختلفـة بحيث تكون أ آنية مع ب ، ب آنية مع جـ « آنية بـالمعنى المذكور آنفا » يكون شرط آنية الحـادثتين أ ، جـ قد تحقق أيضا . وهذا الزعم فرض فيـزيائى حول قانون انتشار الضـوء ولابد من تحققه إذا كنا نريد الاحـتفاظ بقانون ثبوت سـرعة الضوء فى الفراغ .

مختلفين من مجموعة إسناد بحيث يكون موضعاً «خاصاً » لعقربى إحدى الساعتين « آنيـاً » (بالمعنى السابق) مع «نفس» مـوضع عقـربى السـاعة الأخرى تكون « القراءات» «المتماثلة» للساعـتين آنية دائماً (بمعنى التعريف السابق للآنية) .

الفصل التاسع

نسبيـــة الآنيـــة

لقد درجنا حتى الآن على إتخاذ طريق السكة الحديدية مجموعة إسناد لنا ولا بأس أن نفرض أن قطاراً طويلا جداً يتحرك على الـقضبان بسرعة قدرها ع فى الإتجاه الموضـح بالشكل (أ) سيفضل المسافـرون بهذا القطار اتخاذه مجموعة إسناد (مجموعـة إحداثيات) وسيسندون كل ما يحدث إليه وعلـى ذلك فـكل حـادثة تحـدث على طول الطريق تحدث أيضا عند نقطة



(شكل ١)

خاصة من القطار كذلك . ويمكن أيضا أن نحدد الآنية بالنسبة إلى القطار بنفس الطريقـة التى نحـددها بها بالنسـبة إلـى طريقة السكة الحـديدية . ويجابهنا السؤال التالى نتيجة طبيعية لما تقدم :

هـل تكون الحـادثتـان الآنيتـان بالنسـبة إلى طريق السكة الحـديـدية

(مثل الصاعقتين أ ، ب) آنيتين أيضا بالنسبة إلى القطار ؟ وسنوضح مباشرة فيمايلى أن الإجابة على هذا السؤال يجب أن تكون بالنفى .

إننا حينما نقول إن الصاعقتين أ ، ب آنيتان بالنسبة إلى طريق السكة الحديدية نعنى أن أشعة الضوء الصادرة من المكانين أ ، ب حيث تحدث الصاعقتان تتقابل فى النقطة (و) (وهى منتصف المسافة أ ، ب على الطريق) ويناظر الحادثتان أيضاً على طريق السكة الحديدية الموضعين أَ ، بَ على القطار ولنفرض أن النقطة (وَ) هى نفس نقطة الوسط للمسافة أَ بَ على القطار فإنه عندما يحدث وميض البرق[1] تتفق النقطة (و) مع النقطة (وَ) لكنها كما فى الرسم التوضيحى تتحرك إلى اليمين بسرعة قدرها ع هى سرعة القطار فإذا كان هناك راصد يجلس فى (وَ) فى القطار ولا يتحرك بالسرعة ع فإنه سيظل دائماً فى (و) وسيصل إليه شعاعا الضوء الصادران من أ ، ب فى نفس الوقت حيث يلتقيان عند مكان جلوسه ولكنه فى الواقع (بالنسبة إلى طريق السكة الحديدية) يندفع فى اتجاه شعاع الضوء الآتى من ب بينما يبتعد عن الشعاع الآتى من أ وعلى ذلك سيرى الراصد الشعاع الآتى من ب قبل أن يرى الشعاع الآتى من أ وعلى ذلك نصل إلى النتيجة المهمة التالية :

(١) كما يظهر من طريق السكة الحديدية .

إن الحوادث الانية بالنسبة إلى طريق السكة الحديدية ليست آنية بالنسبة إلى القطار والعكس بالعكس (نسبية الآنية) فلكل مجموعة إسناد (مجموعة إحداثيات) زمنها الخاص . وما لم نعين مجموعة الإسناد التى حددنا بالنسبة لها زمن أية حادثة فليس هناك أى معنى لهذا التحديد .

وقبل ظهور نظرية النسبية كانت الفيزياء تسلم تسليما أعمى بأن الزمن أمر مطلق أى أنه مستقل عن حالة الحركة أو السكون التى عليها مجموعة الإسناد . ولقد رأينا الآن أن هذا الزعم لا يتفق مع تصور الآنية الطبيعى جداً وإذا أسقطناه اختفى التناقض الظاهرى بين قانون انتشار الضوء فى الفراغ ومبدأ النسبية (كما أوضحنا فى الفصل السابع) .

ولقد أوقعتنا الاعتبارات التى استعرضناها فى الفصل الثالث (وهى اعتبارات بالية لا يمكن التمسك بها) فى هذا التناقض ؛ فقد ذكرنا فى ذلك الفصل أن الرجل الذى يقطع وهو فى العربة المسافة ف بالنسبة للعربة يقطع نفس المسافة فى نفس المدة بالنسبة إلى قضيب السكة الحديدية . وها نحن نرى فى ضوء ما ذكر فى الفصل الحالى أن الزمن الذى تستغرقه حادثة ما بالنسبة إلى عربة القطار لا يجوز أن يعتبر مساوياً للزمن الذى تستغرقه نفس الحادثة بالنسبة إلى طريق السكة الحديدية ،

وعلى ذلك لا يمكن أن نوافق على أن الرجل حينما يمشى فى العربة ويقطع بالنسبة لها المسافة ف « فى الثانية » يقطع نفس المسافة فى زمن مساو بالنسبة إلى طريق السكة الحديدية .

وفوق ذلك فإن اعتبارات الفصل السادس تعتمد على زعم آخر يبدو عند التحليل الدقيق حكماً تعسفياً ولو أننا كنا نلجأ إليه ضمنياً بصورة مستمرة حتى قبل مجىء نظرية النسبية .

الفصل العاشر

حول نسبية تصور المسافة

دعنا نتخيل نقطتين معينتين على القطار (مثل منتصف العربة الأولى ومنتصف العربة العشرين) الذى يتحرك على قضيب السكة الحديدية بسرعة ع . ودعنا نبحث عن المسافة التى تفصلهما . إننا نعلم مقدماً أنه يجب علينا أن نحصل على مجموعة إسناد نقيس المسافات بالنسبة إليها . وأبسط الأمور هو أن نعتبر القطار نفسه مجموعة الإسناد (مجموعة إحداثيات) والمسافر فى القطار يستطيع أن يقيس المسافة باستعمال قضيب القياس فى خط مستقيم (أى بتطبيقه على أرضية العربات العدد الكافى من المرات للوصول من النقطة الأولى إلى الثانية) ويحدد العدد الدال على عدد مرات تطبيق قضيب القياس طول المسافة المطلوبة .

ولكن الأمر يختلف عن ذلك إذا أردنا قياس هذه المسافة بالنسبة إلى طريق السكة الحديدية ويبدو هنا أن الطريقة المثالية لذلك هى : إذا سمينا أ ، ب النقطتين اللتين على القطار الذى يتحرك بالسرعة ع واللتين يراد إيجاد المسافة التى تفصل بينهما فإن هاتين النقطتين تتحركان على طول

الطريق بالسرعة ع أيضا ونحن نحتاج أولا إلى أن نعين النقطتين أ ، ب على طريق السكة الحديدية التى مرت عليهما النقطتان أ ، ب على القطار فى زمن معين ز بالنسبة إلى الطريق . وهاتان النقطتان (أَ ، بَ) على الطريق الحديدى يمكن تحديدهما تبعاً لتعريف الزمن الذى قدمناه فى الفصل الثامن والمسافة بين هاتين النقطتين (أَ ، بَ) يمكن أن تقاس إذاً بتكرار عملية تطبيق قضيب القياس على طول الطريق .

وليس هناك أى سبب أولى لأن نؤكد أن عملية القياس الأخيرة تتفق فى النتيجة مع عملية القياس الأولى . وهكذا قد يكون طول القطار مقيساً بالنسبة إلى الطريق مختلفاً عن طوله مقيساً بالنسبة إلى القطار نفسه . وهذا الظرف يؤدى بنا إلى إعتراض ثان على آراء الفصل السادس التى تبدو ظاهرياً واضحة ، وهو أنه إذا كان الرجل الذى فى العربة يقطع المسافة ف (مقيسة بالنسبة إلى القطار) فى وحدة الزمن فإن هذه المسافة (مقيسة بالنسبة إلى الطريق) ليست بالضرورة متساوية مع ف .

الفصل الحادى عشر

تحويـــــل لورنتــز

إذا استعرضنا نتائج ثلاثة الفصول الأخيرة نرى أن عدم التوافق الظاهرى الذى نجده بين قانون انتشار الضوء ومبدأ النسبية (الفصل السابع) نشأ عن التسليم فى الميكانيكا الكلاسيكية بفرضين لم يقم عليهما أى دليل . وهذان الفرضان هما :

١ - الفترة الزمانية (الزمن) التى تفصل بين حادثتين مستقلة عن حالة الحركة التى عليها مجموعة الإسناد التى نرجع إليها .

٢ - الفترة المكانية (المسافة) بين نقطتين على جسم جاسىء مستقلة عن حالة الحركة التى عليها مجموعة الإسناد التى نرجع إليها .

فإذا أسقطنا هذين الفرضين اختفت مشكلة الفصل السابع لأن نظرية محصلة السرعات التى استنتجناها فى الفصل السادس تصبح خطأ . وعند ذلك يبدو أن قانون انتشار الضوء فى الفراغ قد يكون متفقاً مع مبدأ النسبية . ويصبح المطلوب معرفته هو كيف يجب تعديل الاعتبارات التى أوضحناها فى الفصل السادس حتى نزيل التناقض الظاهرى بين هاتين النتيجتين التجريبيتين الأساسيتين ؟ وهذا السؤال يقودنا إلى سؤال أعم فقد

كان لدينا فى الفصل السادس أمكنة وأزمنة مسندة إلى كل من القطار والطريق الحديدى فكيف نجد زمن ومكان حادثة بالنسبة إلى القطار إذا كنا نعرف مكانها وزمانها بالنسبة إلى الطريق الحديدى . . ؟ هل من المستطاع الإجابة على هذا السؤال بحيث لا يتعارض قانون انتشار الضوء فى الفراغ مع مبدأ النسبية ؟ أو بعبارة أخرى هل من الممكن إيجاد علاقة بين زمان ومكان الحادثة الواحدة بالنسبة إلى كلتا مجموعتى الإسناد بحيث يكون لكل شعاع من أشعة الضوء السرعة حـ بالنسبة إلى القطار والطريق معاً ؟ إن الإجابة على هذا السؤال هى بالإيجاب وهى إجابة محددة جداً يعبر عنها قانون محدد لتحويل المقادير الزمكانية للحادثة الواحدة تبعاً لتغير مجموعة الإسناد التى تسند إليها .

وقبل أن نتعرض لهذا الموضوع دعنا نقدم له بمايلى :

لقد وجهنا اهتمامنا حتى الآن إلى الحوادث التى تحدث على الطريق الحديدى والتى اعتبرت رياضياً على خط مستقيم وبالطريقة التى أوضحناها فى الفصل الثانى نستطيع أن نتخيل أن هذا المسند إليه مزود جانبيا ورأسياً بهيكل من قضبان القياس المتعامدة بحيث يمكن تحديد مكان أية حادثة بالنسبة إلى هذا الهيكل . وبالمثل فإننا نستطيع أن نتخيل القطار الذى يتحرك بالسرعة ع مستمراً فى كل الفضاء بحيث يمكن تحديد مكان أية حادثة مهما كانت بعيدة بالنسبة لهذا الهيكل الثانى ، ونستطيع دون أن نرتكب أى خطأ أساسى أن نتجاوز عن تداخل هذه الهياكل باستمرار معاً حيث أن الأجسام الجاسئة لا تتداخل فيما بينها .

وفى كل هيكل من هذه الهياكل نتخيل ثلاثة سطوح متعامدة على بعضها البعض تسمى مستويات إحداثية (مجموعة إحداثيات) وعلى ذلك يمثل الطريق الحديدى مجموعة الإحداثيات م وأية حادثة أينما تحدث يمكن تحديد مكانها بالنسبة إلى م بوساطة ثلاثة أعمدة س ، ص ، ش على المستويات الإحداثية وبالنسبة للزمن بالقيمة الزمنية ز أما بالنسبة إلى مَ فيحدد مكان نفس الحادثة وزمانها القيم سَ ، صَ ، شَ ، زَ المقابلة وهى تختلف عن س ، ص ، ش ، ز وقد أوضحنا بالتفصيل فيما تقدم كيف يجب أن نعتبر هذه المقادير نتائج للقياس الفيزيائى .

من الواضح أننا نستطيع أن نضع المشكلة على النحو الآتى :

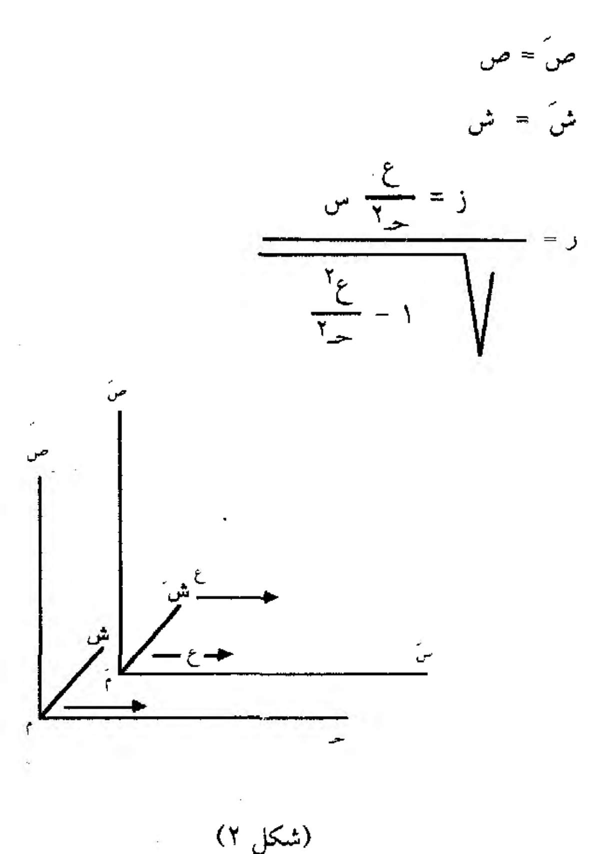
ماهى قيم المقادير سَ ، صَ ، شَ ، زَ لحادثة ما بالنسبة إلى مَ إذا كنا نعلم قيم المقادير س ، ص ، ش ، ز لنفس الحادثة بالنسبة إلى م . . . ؟ ويجب أن نختار العلاقات بين هذه القيم بحيث تحترم قانون انتشار الضوء فى الفراغ بالنسبة إلى م ، مَ وبالرجوع إلى الوضع الموضح فى (الشكل ٢) لمجموع الإحداثيات نجد أن حل المشكلة تقدمه المعادلة :

$$\text{سَ} = \frac{\text{س} - \text{ع ز}}{\sqrt{1 - \frac{\text{ع}^{2}}{\text{حـ}^{2}}}}$$

$$ص' = ص$$

$$ش' = ش$$

$$ز' = \frac{ز = \frac{ع}{حـ^{٢}} س}{\sqrt{١ - \frac{ع^{٢}}{حـ^{٢}}}}$$



(شكل ٢)

وتعرف هذه المجموعة من المعادلات بتحويل لورنتز ولو جعلنا أساساً لنا بدلا من قانون انتشار الضوء تلك المزاعم الضمنية التى كانت تركن إليها الميكانيكا قديماً والتى ترتكز على فكرة الطابع المطلق للأزمنة والأطوال لحصلنا بدلا من المعادلات السابقة على المعادلات التالية :

$$س' = س - ع ز$$

$$ص' = ص$$

$$ش' = ش$$

$$ز' = ز$$

وتسمى غالباً هذه المجـموعة الأخيرة من المعادلات **بتـحويل** جاليليو. ويمكننا الحصول على تحويل **جاليليو** من تحويل **لورنتز**، إذا عوضنا عن سرعة الضوء حـ في التحويل الأخير (تحويل لورنتز) بكمية متناهية الكبر .

وفيمايلى تستطيع أن ترى فوراً أن قانون انتشار الضوء فى الفراغ تبعاً لتحويل **لورنتز** واحد بالنسـبة لكل من مـجموعـة الإسناد م ومجمـوعة الإسناد مَ . ولذلك نرسل إشـارة ضوئيـة على طول المحور الإيجـابى س وهذا المؤثر الضوئى يتقدم تبعاً للمعادلة : س = حـ زَ

أى بسرعـة الضوء حـ وتـبعاً لمعـادلات تحويل لورنتـز نرى أن هذه العلاقة البسـيطة بين س ، ز تعنى علاقة بين سً ، زَ ونحن فى الواقع إذا عـوضنا عن س بالمقـدار حـ ز فى المعـادلة الأولى والمعـادلة الرابعـة من معادلات تحويل لورنتز حصلنا على :

$$س' = \frac{ز (حـ - ع)}{\sqrt{1 - \frac{ع^2}{حـ^2}}} ،$$

$$\text{زَ} = \frac{\text{ز} \left(1 - \frac{\text{ع}}{\text{حـ}} \right)}{\sqrt{1 - \frac{\text{ع}^2}{\text{حـ}^2}}}$$

ومنها نحصل بالقسمة على المعادلة :

$$\text{سً} = \text{حـ زَ}$$

وإذا أسندنا إلى المجموعة مَ يحدث انتشار الضوء تبعاً لهذه المعادلة . وهكذا نرى أن سرعة انتشار الضوء بالنسبة إلى المجموعة مَ تساوى أيضا حـ ونحصل على نفس النتيجة لأشعة الضوء التي تنتشر في أى اتجاه كان . وطبعا ليس في هذا أى غرابة حيث إن معادلات تحويل لورنتز قد اشتقت وفقاً لهذا الرأى .

الفصل الثانى عشر
سلوك الساعات وقضبان القياس المتحركة

هب أننى أضع قضيباً طوله متر فى اتجاه المحور سَ لمجموعة الإحداثيات مَ بحيث يتفق أحد طرفيه (البداية) مع نقطة الصفر بينما يتفق الطرف الثانى (النهاية) مع النقطة سَ = ١ فما طول هذا القضيب بالنسبة إلى م ؟ وحتى نحصل على ذلك ما علينا إلا أن نبحث أين يقع مبدأ القضيب ونهايته بالنسبة إلى م عند الزمن ز الخاص بالمجموعة م وبوساطة المعادلة الأولى من تحويل لورنتز نجد أن قيمة هاتين النقطتين عند الزمن ز = صفر يمكن إثبات أنها :

$$\text{س (ابتداء القضيب) = صفر } \sqrt{1 - \frac{\text{ع}^2}{\text{حـ}^2}} = \text{صفر}$$

$$\text{س (نهاية القضيب) = ١ } \sqrt{1 - \frac{\text{ع}^2}{\text{حـ}^2}}$$

وتكون المسافة بين النقطتين هى $\sqrt{1 - \frac{\text{ع}^2}{\text{حـ}^2}}$ ولكن قضيب القياس يتحرك بالسرعة ع بالنسبة إلى م وعلى ذلك نجد أن طول قضيب قياس

جاسىء طوله متر يتحرك فى اتجاه طوله بسرعة قدرها ع هو $\sqrt{1 - \frac{ع^2}{حـ^2}}$ من المتر وهكذا يكون القضيب الجاسىء أقصر فى حالة الحركة منه فى حالة السكون ، وكلما زادت سرعة حركته زاد قصره بحيث إذا بلغت السرعة

ع = حـ يصبح طوله $\left(\sqrt{1 - \frac{ع^2}{حـ^2}}\right)$ = صفر وعند السرعات الأكبر

من حـ يصبح الجذر التربيعى خيالياً . ومن هذا نستنتج أن السرعة حـ فى نظرية النسبية تلعب دور السرعة القصوى التى لا يمكن أن يبلغها أو يزيد عنها أى جسم حقيقى .

وواضح بالطبع أن هذا المظهر للسرعة حـ كسرعة قصوى جاء نتيجة لمعادلات تحويل لورنتز لأنها تصبح لا معنى لها إذا اخترنا قيماً للسرعة أكبر من حـ وعلى العكس لو أننا تأملنا قضيب قياس طوله متر فى حالة سكون وفى المحور (س) بالنسبة إلى م لوجدنا أن طوله بالنسبة إلى راصد

فى مَ سيكون $\sqrt{1 - \frac{ع^2}{حـ^2}}$ وهذا متفق تماماً مع مبدأ النسبية وهو أساس تأملاتنا .

وواضح بداهة أن معادلات التحويل تهيىء لنا حتما فرصة معرفة الشىء الكثير عن السلوك الفيزيائى لكل من قضبان القياس والساعات لأن المقادير س . ص . ش . ز ليست إلا نتائج قياسات لا أكثر ولا أقل

يمكن الحصول عليها عن طريق قضبان القياس والساعات . ولو أننا جعلنا أساساً لتفكيرنا التحويل الجاليلى لما حصلنا على انكماش القضيب نتيجة لحركته .

دعنا الآن نتأمل ساعة موضوعة دائما عند أصل مَ (س = صفر) ، ز = صفر ، زَ = ١ هما دقتان متتاليتان لهذه الساعة والمعادلتان الأولى والرابعة من تحويل لورنتز تعطيانا لهاتين الدقتين :

ز = صفر

$$ز = \frac{١}{\sqrt{١ - \frac{ع^٢}{حـ^٢}}}$$

وكما يبدو من م تتحرك الساعة بالسرعة ع وعلى ذلك تكون فترة الزمن بين الدقتين بالنسبة إلى م ليست ثانية ولكن $١ = \frac{١}{\sqrt{١ - \frac{ع^٢}{حـ^٢}}}$ من الثوانى أى زمناً أكثر قليلا وعلى ذلك تكون الساعة أبطأ فى حالة الحركة منها فى حالة السكون . وهنا أيضاً تلعب السرعة حـ دور السرعة القصوى التى لا يمكن بلوغها .

الفصل الثالث عشر

نظرية محصلة السرعات

تجربة فيزو

إننا فى الحياة العملية لا نحرك الساعات وقضبان القياس إلا بسرعات ضئيلة إذا ما قورنت بسرعة الضوء وعلى ذلك لن نستطيع أن نتحقق من نتائج الفصل السابق عملياً . ومع ذلك لابد أنه قد لفت نظرك غرابة هذه النتائج ولهذا يسرنا أن نستخلص من النظرية تبعاً لما أوضحناه فى الفصل السابق نتيجة قد تم التحقق منها عملياً بصورة شائقة . لقد اشتققنا فى الفصل السادس نظرية محصلة السرعات فى اتجاه واحد على النحو الذى تتبعه الميكانيكا الكلاسيكية ويمكن استنتاج هذه النظرية أيضا من تحويل جاليليو (الفصل الحادى عشر) فبدلا من الرجل الذى يمشى فى عربة القطار نتصور نقطة تتحرك بالنسبة إلى مجموعة الإحداثيات مَ حسب المعادلة :

سَ = ع زَ

وبوساطة المعادلة الأولى والرابعة من تحويل جاليليو يمكننا التعبير عن سَ ، زَ بدلالة س ، ز عندئذ نحصل على المعادلة س = (ع+ غ) ز .

وهذه المعادلة لا تعبر عن شيء سوى قانون حركة النقطة بالنسبة إلى مجموعة الإسناد م (أو الرجل بالنسبة إلى الطريق الحديدية) وسنرمز إلى هذه السرعة بالرمز عـ وحينئذ نحصل كما فى الفصل السادس على :

$$\text{عـ} = (\text{ع} + \text{غ}) \qquad (\text{أ})$$

ولكننا نستطيع أن نجرى العملية نفسها على أساس نظرية النسبية عند ذلك يجب علينا ن نعبر عن سَ ، زَ فى المعادلة :

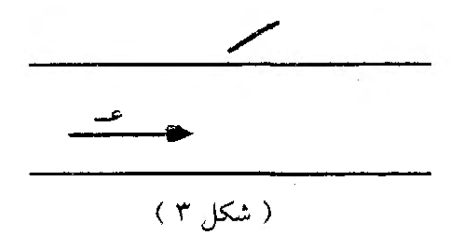
$$\text{سَ} = \text{غَ}\ \text{زَ}$$

بدلالة س ، ز وباستعمال المعادلتين الأولى والرابعة من تحويل لورنتز نحصل بدلا من المعادلة (أ) على المعادلة :

$$\text{عـ} = \frac{\text{ع} + \text{غ}}{1 + \frac{\text{ع غ}}{\text{حـ}^2}} \qquad (\text{ب})$$

وهو ما يناظر محصلة السرعات فى اتجاه واحد تبعاً لنظرية النسبية . والسؤال الذى يجابهنا الآن هو : أى هاتين النظريتين أكثر اتفاقاً مع التجربة . . . ؟ وفى هذا الموقف تسعفنا وتشد أزرنا تجربة على جانب عظيم من الأهمية أجراها الفيزيائى القدير فيزو منذ أكثر من نصف قرن وأعاد إجراءها منذ ذلك الحين عدد من أحسن الفيزيائيين التجريبيين حتى أصبحت نتيجتها لا يتطرق إليها شك على الإطلاق . والتجربة تدور

حول المسألة التالية : إن الضوء ينتقل فى سائل ساكن بالسرعة فبأية سرعة ينتقل فى اتجاه السهم فى الأنبوبة (انظر الشكل ٣) إذا كان السائل المذكور عالية يندفع هو نفسه فى الأنبوبة بالسرعة ع . . . ؟



(شكل ٣)

سيكون علينا تمشياً مع مبدأ النسبية أن نسلم بأن انتشار الضوء سيحدث دائماً بنفس السرعة غ بالنسبة للسائل سواء أكان هذا السائل يتحرك بالنسبة للأجسام الأخرى أم لا وهكذا تصبح سرعة الضوء بالنسبة إلى السائل معروفة وسرعة السائل بالنسبة إلى الأنبوبة معروفة أيضاً ونريد معرفة سرعة الضوء بالنسبة إلى الأنبوبة .

وواضح أن المشكلة التى أمامنا الآن هى نفس مشكلة الفصل السادس حيث تلعب الأنبوبة دور الطريق الحديدية أو مجموعة الإسناد مَ وأخيراً سنجد أن الضوء يلعب دور الرجل الذى كان يمشى بطول العربة . فإذا رمزنا إلى سرعة الضوء بالنسبة إلى الأنبوبة بالرمز ع فإننا يمكن أن نحصل عليها من المعادلتين أ ، ب الأولى باستعمال تحويل جاليليو والثانية باستعمال تحويل لورنتز فأى الجوابين هو الصحيح ؟ ولقد جاءت

التجربة فى جانب المعادلة[١] المشتقة من نظرية النسبية والاتفاق بينهما تام جداً ، وتبعاً لأدق القياسات التى قام بها زيمان تعبر المعادلة عن تأثير سرعة جريان السائل غ على انتقال الضوء إلى تقريب يقرب من ١٪ .

ومع ذلك يجب أن لا يفوتنا الآن التنبيه إلى أن نظرية تفسر هذه الظاهرة كان قد سبق أن قدمها هـ . أ . لورنتز قبل مجيء نظرية النسبية بوقت طويل ، ولكن نظرينه وكانت ديناميكية كهربية بحتة فى طبيعتها كان قد حصل عليها بالالتجاء إلى فروض أخرى حول البناء الكهرومغناطيسى للمادة . وهذا الوضع مع ذلك لا يقلل أبداً من نتيجة التجربة كاختبار مهم يؤيد نظرية النسبية لأن الديناميكا الكهربية التى وضعها ماسكويل لورنتز والتى قامت على أساسها النظرية الأولى لتفسير التجربة لا تتعارض بأى شكل مع نظرية النسبية ، بل إن هذه الأخيرة قد نبعت من الدنياميكا الكهربية كنظرية تجمع وتعمم بطريقة مذهلة الافتراضين اللذين بنيت عليهما الديناميكا الكهربية واللذين كانا قبل ذلك مستقلين الواحد عن الآخر .

---

(١) لقد وجد فيزو أن $\text{عـ} = \text{ع} + \text{غ}\left(1 + \frac{1}{\text{ن}^{2}}\right)$ حيث $\text{ن} = \frac{\text{ح}}{\text{ع}}$ وهو معامل انكسار السائل ومن الناحية الأخري بالنسبة إلى صغر $\frac{\text{ع}\,\text{غ}}{\text{ح}^{2}}$ مقارنة بالواحد الصحيح يمكن أن تستبدل (ب) أولا بالمقدار $\text{عـ} = (\text{ع} + \text{غ})\left(1 - \frac{\text{ع}\,\text{غ}}{\text{ح}^{2}}\right)$ أو إلى نفس درجة التقريب بالمقدار : $\text{ع} + \text{غ}\left(1 + \frac{1}{\text{ن}^{2}}\right)$ وهى تتفق ونتيجة فيزو .

الفصل الرابع عشر
القيمة الكاشفة للنظرية النسبية

نستطيع أن نلخص سلسلة أفكارنا السابقة فيمايلى : لقد أدت بنا التجربة إلى الاقتناع بأمرين : صدق مبدأ النسبية من ناحية وأن سرعة انتقال الضوء فى الفراغ يجب اعتبارها مقداراً ثابتاً من الناحية الأخرى ، وبإتخاذ هذين الفرضين الأساسيين حصلنا على قانون تحويل الإحداثيات المتعامدة س . ص . ش والزمن ز للحوادث - وهى لب جميع العمليات الطبيعية - وفى هذه الحالة لم نحصل على تحويل جاليليو ولكننا حصلنا بخلاف الحال فى الميكانيكا الكلاسيكية على تحويل لورنتز .

ولقد لعب قانون انتشار الضوء وصحته واضحة للعيان دوراً هاماً فى الوصول إلى هذه النتيجة ومادام لدينا تحويل لورنتز فإننا نستطيع أن نجمع بينه وبين مبدأ النسبية لنحصل على النظرية على النحو التالى :

« يجب أن تكون القوانين الطبيعية العامة بحيث لا تتغير إذا استبدلت المتغيرات س . ص . ش . ز المتعلقة بمجموعة الإحداثيات الأصلية م بالمتغيرات سَ . صَ . شَ . زَ الخاصة بمجموعة الإسناد مَ وفى هذه الحالة يحدد العلاقة بين المتغيرات الأولى والثانية تحويلات لورنتز أو

أو بعبارة أخرى مختصرة يجب أن تكون القوانين الطبيعية متغيرات متعدية بالنسبة إلى تحويلات لورنتز » .

هذا هو الشرط الرياضى المحدد الذى تستوجبه نظرية النسبية فى أى قانون طبيعى . ولذلك أصبح للنظرية أثر كاشف عميق فى البحث عن القوانين الطبيعية العامة . فإذا وجد أن قانوناً عاماً من قوانين الطبيعة لا يحقق هذا الشرط فعلى الأقل لابد أن يكون أحد الفرضين الأساسيين للنظرية خاطئاً . والآن دعنا نرى النتائج العامة التى أدت إليها هذه النظرية .

الفصل الخامس عشر
النتائج العامة للنظرية

اتضح فى سياق ما تقدم أن نظرية النسبية الخاصة قد تبلورت من دراسة الضوء والديناميكا الكهربائية وهى لم تغير النتائج النظرية فى هذين المجالين ولكنها بسّطت إلى حد بعيد البناء النظرى - أى اشتقاق القوانين - والأهم من ذلك بمراحل أنها اختصرت إلى حد بعيد عدد الفروض المستقلة التى كانت تستند إليها وتقوم عليها وجهة النظر السابقة . ولقد جعلت نظرية النسبية الخاصة نظرية ماكسويل لورنتز مرضية بشكل جعل علماء الفيزياء على استعداد لقبولها ولو لم تكن جميع التجارب قد وقفت فى صفها وأيدتها تأييداً كاملا .

واحتاج الأمر إلى تعديل الميكانيكا الكلاسيكية حتى تتفق مع نظرية النسبية الخاصة . ولم تؤثر هذه التعديلات تأثيراً جوهرياً إلا فى القوانين التى تتعلق بالسرعات الكبيرة أى عندما تقترب سرعة الأجسام المتحركة من سرعة الضوء حـ . وليس لدينا مثال لهذه السرعات إلا ما يتعلق بالإلكترونيات والأيونات أما بالنسبة للسرعات الأخرى فقد كان الاختلاف بين نتائج قوانين الميكانيكا الكلاسيكية ونتائج نظرية النسبية الخاصة أضأل

من أن يظهر عملياً وسوف لا نتعرض لحركة النجوم إلى أن ندرس نظرية النسبية العامة . إن طاقة الحركة لنقطة مادية تتحرك لم يعد يحددها المقدار

المعروف ك $\frac{ع^2}{2}$ بل يعبر عنها بالتعبير :

$$\frac{ك\ حـ^2}{\sqrt{1 - \frac{ع^2}{حـ^2}}}$$

وهذا المقدار يقترب من مالا نهاية كلما اقتربت السرعة ع من سرعة الضوء حـ ، وعلى ذلك يجب أن تظل السرعة دائما أقل من حـ مهما كبرت العجلة وإذا وضعنا التعبير عن طاقة الحركة على شكل متسلسلة حصلنا على :

$$ك\ حـ^2 + ك = \frac{ع^2}{2} + \frac{3}{8}\ ك\ \frac{ع^2}{حـ^2} + \ \ldots\ldots$$

عندما يكون الحد $\frac{ع^2}{حـ^2}$ صغيراً مقارناً بالواحد الصحيح فإن الثالث من هذه الحدود يكون دائماً صغيراً مقارناً بالحد الثانى ، وهذا الأخير هو الذى يوضع وحده موضع الاعتبار فى الميكانيكا الكلاسيكية . والحد الأول ك $حـ^2$ لا يتضمن السرعة وليس هناك محل للنظر إليه الآن إذا كان ما يعنينا هو مسألة كيفية اعتماد طاقة النقطة المادية على السرعة وسنتكلم عن

المعنى الأساسى لذلك الحد فيما بعد .

وأهم النتائج ذات الطابع العام التى أدت إليها نظرية النسبية الخاصة تتعلق بفكرة الكتلة ؛ فقبل مجئ النسبية كانت الفيزياء تسلم بقانونى بقاء لهما أهمية أساسية هما قانون بقاء الطاقة وقانون بقاء الكتلة . وكان هذان القانونان يبدوان مستقلين عن بعضهما البعض تماماً . ولكنهما عن طريق نظرية النسبية قد ادمجا فى قانون واحد وسنرى فيمايلى باختصار كيف تم هذا التوحيد وأى معنى يحمله ذلك فى طياته .

إن مبدأ النسبية يتطلب أن يكون بقاء الطاقة صحيحاً لا بالنسبة إلى مجموعة الإحداثيات وحدها بل أيضا إلى كل مجموعة إحداثيات مَ فى حالة حركة انتقال منتظمة بالنسبة إلى المجموعة م أو باختصار بالنسبة إلى كل مجموعة إسناد جاليلية . ويتطلب أيضاً وذلك على عكس ما فى الميكانيكا الكلاسيكية أن يكون تحويل لورنتز هو العامل الحاسم فى الانتقال من مجموعة كهذه إلى أخرى .

وبقليل من التأمل البسيط نسبياً نجد أننا نصل إلى النتيجة التالية من هذه المقدمات ، وذلك متفق مع المعادلات الأساسية للديناميكا الكهربية لماكسويل : إذا امتص جسم يتحرك بالسرعة ع مقداراً من الطاقة ق[1] على شكل إشعاع دون أن يحدث نتيجة لذلك أى تغيير فى سرعته فإن طاقته تزيد نتيجة لذلك بالمقدار :

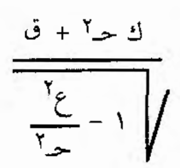
(١) ق هى الطاقة المستمدة كما تبدو بالنسبة إلى مجموعة اسناد تتحرك مع الجسم .



وبتأمل التعـبير الذى قدمناه آنفـاً لطاقة الحركة للجـسم نجد أن طاقة الحركة المطلوبة للجسم تصبح :

$$\frac{\left[ك + \frac{ق}{حـ^{2}} \right] حـ^{2}}{\sqrt{1 - \frac{ع^{2}}{حـ^{2}}}}$$

وهكذا تصبح للجـسم نفس الطاقة التى لجسم كـتلته $\left[ك + \frac{ق}{حـ^{2}} \right]$ ويتحرك بالسـرعة ع . من هنا يمكن أن نقول : إذا اكتسب جسم قدراً من الطاقة ق فـإن كتلته القصـورية تزيد بالمقدار $\frac{ق}{حـ^{2}}$ وليست كتلة الـقصور لجسم ما ثابتـة بل تتغيرتبعـاً لتغير طاقـة الجسم . بل يمكن أن نقول أن كتلة قصور مجموعة من الأجسام يمكن أن تعتبر دليلا على مقدار طاقتها . وعلى ذلك يصبح قانون بقـاء كتلة مجموعة ما مطابقـا لقانون بقاء الطاقة للمجموعة نفسهـا . وهو صحيح مادامت المجموعة لا تمتص ولا تشع أية طاقة . وإذا عبرنا عن الطاقة بالتعبير :



وجدنا أن الحــد ك حـ^{2} الذى لفت نظرنا من قــبل ليس إلا مقــدار الطاقة[1] التى يملكها الجسم قبل أن يمتص **ق** .

وليس من المستطاع حالياً المقارنة المباشــرة بالتجربة لهذه العلاقة (كان ذلك صــحيــحاً سنــة ١٩٢٠ ولكن انظر التعلــيق فى أخر هذا الفــصل) بالنسبة لأن تغيرات الطاقة **ق** التى يمكن أن تعرض لها مجموعة ما ليست كبيــرة بالحد الكافى لأن تجعل نفــسها محــسوسة كتغــيير فى كتلــة قصور المجمــوعة حيث أن $\frac{ق}{حـ^{2}}$ مــقدار صغــير جداً بالمقــارنة بالكتلة **ك** التى كــانت موجــودة قبل تغــير الطاقــة، ولهذا الســبب اســتطاعت الميكانيكا الكلاسيكيــة بنجاح أن تعتــبر قانون بقاء الكتلــة قانوناً صحيــحاً مستــقلا بذاته.

ودعنى أضيف إلــى ما تقدم مــلاحظة أخيرة أســاسيــة الجوهر . إن النجاح الذى حققته تفسيرات فــرداى - ماكسويل للتأثير الكهرومغناطيسى عن بعد قــد جعلت الفيزيائيين أكــثر اقتناعــا بأنه لا وجود لشىء من نوع «التأثير الفورى عن بعد » (أى الذى لا يتــضمن وسطاً بينهما) الذى نجده

(١) كما تبدو لمجموعة إحداثيات تتحرك مع الجسم .

فى قانون الجاذبية لنيوتن . وحسب نظرية النسبية يحل التأثير عن بعد بسرعة الضوء دائما محل التأثير الفورى أو التأثير عن بعد بسرعة انتشار لانهائية وهذا مرتبط بحقيقة أن السرعة حـ تلعب دوراً أساسياً فى النظرية. وفى الجزء الثانى من هذا الكتاب سنرى بأى شكل ستتعدل هذه النتيجة فى نظرية النسبية العامة .

تعليق :

مع تقدم عمليات التحويل النووية التى تنشأ من قذف العناصر بدقائق ألفا أو البروتونات أو أشعة جاما تأكدت علاقة تكافؤ الكتلة والطاقة حسب المعادلة ق = ك حـ٢ فمجموع الكتل المتبادلة التأثير مضافا إليه مكافىء الكتلة للطاقة الحركية للدقائق المقذوفة (الفوتون) أكبر دائما من مجموع الكتل الناتجة عن التحويل والفرق بينهما هو الكتلة المكافئة لطاقة الحركة للدقائق المتولدة أو الطاقة الكهرومغناطيسية المشعة (فوتونات جاما) . وبنفس الطريقة نجد أن كتلة الذرة المشعة التى تتحلل فجأة أكبر دائما من مجموع كتل الذرات الناشئة بمقدار الكتلة المكافئة لطاقة الحركة للدقائق المتولدة (أو الطاقة الفوتونية) وقياسات الطاقة المتولدة عن التفاعلات النووية هى ومعادلات هذه التفاعلات يجعلان من الممكن تقدير الأوزان الذرية بغاية الدقة .

الفصل السادس عشر

نظرية النسبية الخاصة والتجربة

إلى أى مدى تؤيد التجربة نظرية النسبية الخاصة . . . ؟ ليس من السهل الإجابة على هذا السؤال للسبب الذى سبق ذكره عند الكلام عن تجربة فيزو الأساسية . وكلنا نعلم أن نظرية النسبية الخاصة قد تبلورت من نظرية ماكسويل لورنتز عن الظواهر الكهرومغناطسية ، وتبعاً لذلك فإن كل الحقائق التى تؤيد هذه النظرية الأخيرة تؤيد نظرية النسبية . ولكنى أقتصر هنا على ذكر الحقيقة التالية وحدها نظراً لما لها من الأهمية البالغة .

إن نظرية النسبية تتيح لنا أن نعرف مقدما التأثيرات التى تتناول الضوء الآتى إلينا من النجوم الثابتة . ومن الممكن الوقوف على هذه التأثيرات بطريقة متناهية البساطة . وقد وجد أنها وهى راجعة إلى حركة الأرض بالنسبة لهذه النجوم الثابتة تتفق مع التجربة . ونحن نشير هنا إلى الحركة السنوية للموقع الظاهرى للنجوم الثابتة الناشىء عن دوران الأرض حول الشمس الزغ) وإلى تأثير المركبات القطرية لحركات النجوم الثابتة بالنسبة إلى الأرض على لون الضوء الذى يصل إلينا منها ، وهذا التأثير

الأخير عبارة عن انتقال طفيف فى خطوط الطيف فى الضوء المرسل من النجوم الثابتة إلينا إذا قورن بوضع نفس هذه الخطوط إذا كان مصدر الضوء على الأرض (ظاهرة دوبلر) . والبراهين التجريبية التى تؤيد نظرية مكسويل - لورنتز وتؤيد أيضا نظرية النسبية أكثر من أن تحصى هنا . وهى فى الحقيقة تحدد الإمكانيات النظرية بشكل لم تقو على الصمود أمامه غير نظرية ماكسويل لورنتز .

ولكن هناك مجموعتان من الحقائق التجريبية لا يمكن تطبيق نظرية ماكسويل لورنتز عليها إلا إذا أدخلنا على تلك النظرية - وذلك دون أن نلجأ إلى نظرية النسبية - فرضاً يبدو مفتعلا .

فمن المعروف أن أشعة المهبط وكذلك الأشعة المعروفة بأشعة بيتا التى تشعها المواد ذات الإشعاع كليهما تتكون من جسيمات صغيرة مشحونة بشحنة كهربية سالبة (إلكترونيات) لها قصور ذاتى صغير جداً وسرعة كبيرة جدا . وإذا درسنا انحراف هذه الإشعاعات تحت تأثير المجالات الكهربائية والمجالات المغناطيسية أمكننا أن نعرف بالضبط قانون حركتها .

وتواجهنا عند دراسة هذه الإلكترونيات نظرياً فى ضوء نظرية الديناميكا الكهربية مشكلة ناشئة عن عجز هذه النظرية نفسها عن تفسير طبيعة الإلكترونات . فلما كانت الكتل الكهربائية المتشابهة النوع تتنافر فيما بينها فإن الكتل الكهربائية السالبة التى تكون الإكترونات يجب أن

تتناثر بفعل تنافرها فيما بينها ما لم تكن واقعة تحت تأثير قوى من نوع آخر لم تتضح لنا حتى الآن[1] . فإذا فرضنا أن المسافات التى تفصل بين الكتل الكهربائية التى تكون الإلكترونات تظل ثابتة أثناء تحركها بالنسبة لبعضها البعض (اتصال جاسيء بالمعنى الميكانيكى الكلاسيكى) فإن القانون الذى نصل إليه معبراً عن حركة الإلكترون لا يتفق مع التجربة . ولقد كان لورنتز هو أول من افترض من وجهة نظر شكلية بحتة أن شكل الإلكترون يعانى انكماشا فى إتجاه حركته وأن كمية الانكماش تتناسب

مع $\sqrt{١ - \frac{ع^٢}{حـ^٢}}$ وهذا الفرض الذى لا تبرره أى حقائق الديناميكا الكهربية يمدنا بالقانون الخاص بحركة الإلكترون وهو القانون الذى حققته التجربة بدقة فائقة أخيراً .

ونظرية النسبية تؤدى إلى نفس قانون الحركة دون حاجة إلى أى افتراض آخر فيما يتعلق ببناء أو سلوك الإلكترون . وقد وصلنا إلى نتيجة مماثلة لهذا فى الفصل الثامن فيما يتعلق بتجربة فيزو التى تنبأت نظرية النسبية بنتيجة مطابقة لها دون حاجة إلى أى افتراض حول طبيعة السائل .

والمجموعة الثانية من الحقائق التى أشرنا إليها تتعلق بمسألة إمكان أو

---

(١) توضح نظرية النسبية العامة أن الكتل الكهربائية للاكترونات تتجمع معا تحت تأثير قوى الجذب .

استحالة جعل حركة الأرض فى الفضاء محسوسة بالتجربة على الأرض . لقد لاحظنا فى الفصل الخامس أن كل المحاولات التى أجريت لهذا الغرض كانت نتائجها سلبية . وقبل وضع نظرية النسبية لم يكن مستطاعاً إدراك سبب هذه السلبية لأن الأفكار الخاطئة التى توارثناها عن الزمان والمكان حالت بيننا وبين الشك فى قيمة التحويل الجاليلى فى حالة الانتقال من مجموعة إسناد إلى مجموعة إسناد أخرى . فإذا افترضنا أن معادلات ماكسويل لورنتز صحيحة بالنسبة إلى مجموعة الإسناد م مثلا وجدنا عند تطبيقها على مجموعة إسناد أخرى مَ تتحرك بحركة منتظمة بالنسبة إلى م أنها غير مطابقة وذلك فى حالة افتراضنا أن علاقات التحويل الجاليلى بين إحداثيات مجموعة الإسناد م ومجموعة الاسناد مَ هى السائدة . وهكذا يبدو أنه من بين كل مجاميع الإسناد الجاليلية هناك مجموعة إسناد واحدة م تقابل حالة خاصة من الحركة تتميز عما عداها من المجموعات بحيث تبدو فريدة فى بابها . وقد فسر بعض العلماء هذا الأمر فيزيائيا بأن اعتبروا م فى حالة سكون بالنسبة «لأثير الفضاء» الذى تخيلوه وفرضوا وجوده فرضاً ، بينما اعتبروا من الناحية الأخرى كل مجموعات الإحداثيات مَ التى تتحرك بالنسبة إلى م فى حالة حركة بالنسبة لهذا الأثير. وقد نسبت إلى حركة مَ فى الأثير (دفع الأثير بالنسبة إلى مَ) أشد القوانين تعقيدا والتى كان يظن أنها تنطبق على مَ وبالتحديد استلزم الأمر أن نفترض دفع الأثير هذا قائما بالنسبة للأرض أيضاً . ولمدة طويلة وجه

علماء الفيزياء جهودهم صوب محاولة الاستدلال على هذا الدفع على سطح الأرض .

وفي إحدى هذه المحاولات ابتكر **ميكلسن** محاولة تبدو حاسمة إذ تصور مرآتين مثبتتين على جسم جاسيء بحيث يتقابل سطحاهما العاكسان (وجها لوجه) . يستغرق شعاع الضوء زمنا محدداً ليقطع المسافة بينهما ذهابا وإيابا إذا كان الجهاز ثابتا بالنسبة للأثير ولكن إذا كان الجهاز متحركا بالنسبة للأثير فقد وجد بالتقدير الحسابي أن الزمن زَ اللازم للعملية في هذه الحالة يختلف قليلا عن الزمن ز ، وفوق ذلك فقد أظهر التقدير الحسابي أنه إذا كانت سرعة الجهاز ع بالنسبة للأثير فإن هذا الزمن زَ يختلف في حالة ما إذا كان اتجاه حركة الجسم عمودياً على مستوى المرآتين عنه في حالة ما إذا كان اتجاه حركته موازياً لهما . وبالرغم من أن الفرق بين هذين الزمنين ضئيل جداً فقد أجرى ميكلسن - مورلي تجربة على أساس التداخل الضوئي يمكن الاستدلال منها على ذلك الفرق . ومع كل جاءت نتيجة التجربة سلبية وكان هذا أمراً محيراً جداً لعلماء الفيزياء . وقد تغلب لورنتز وفتزجرالد على هذا الموقف المتأزم بأن افترضا أن حركة أي جسم بالنسبة للأثير تحدث انكماشاً في الجسم في اتجاه الحركة . وأن مقدار هذا الانكماش كاف لأن يعادل ذلك الفرق في الزمن الذي أشرنا إليه آنفاً . وبمقارنة هذا بما جاء في الفصل الثاني عشر نرى أنه من وجهة نظر النظرية النسبية كان هذا الحل للمشكلة هو الحل

الصحيح ولـكنه تم فى نظرية النسبية على أســاس أسلم جداً ، فليس فى نظرية النســبية شيء مـثل مجمـوعة الإحداثيـات المميـزة أو الفريدة التى استـوجبت فكرة الأثـير . وعلى ذلك فليس هناك دفع فى الأثيـر وليس هناك داع لأية تجربة للاستدلال عليه . إن انكماش الأجـسام المتحركة يتبع المبدأين الأساسيين للنظرية دون ما حاجة إلى اصطناع أى فروض خاص. والعامل الأول فى هذا الانكماش ليس هو الحركـة فى حد ذاتها فليس لها أى معنى مسـتقل إنما هو الحركة بالنـسبة إلى مجمـوعة الإسناد التى وقع عليها الاختيار وعلى ذلك فجهاز المرآة لميكلسن - مورلى لا يعانى إنكماشاً بالنسبة إلى مجموعة إسناد تتحرك على الأرض ولكنه ينكمش بالنسبة إلى مجموعة إسناد فى حالة سكون بالنسبة إلى الشمس .

الفصل السابع عشر

فضاء منكوفسكى رباعى الأبعاد

إن القراء من غير الرياضيين يتتابهم الفزع والرعب حينما يقرأون عن الأشياء الرباعية الأبعاد ، وهم يحسون عند ذلك إحساساً لا يختلف كثيراً عما يحسون به فى مواجهة السحر والسحرة . ومع ذلك فليس هناك قول أعم من أن العالم الذى نعيش فيه متصل زمانى مكانى رباعى الأبعاد .

إن المكان متصل ثلاثى الأبعاد ، ونعنى بهذا أننا نستطيع أن نحدد موضع النقطة الساكنة بوساطة ثلاثة أعداد (إحداثيات) س . ص . ش وأن هناك عدداً لا نهائياً من النقط المتجاورة يحدد موضع أياً منها الإحداثيات سَ . صَ . شَ يمكن أن تكون قريبة بأية درجة نختارها إلى الإحداثيات س . ص. ش الخاصة بالنقط الأولى ولهذا السبب نسميها المتصل . ونظراً لأن له إحداثيات ثلاثا فإننا نقول عنه إنه ثلاثى الأبعاد .

وبالمثل فإن دنيا الظواهر الطبيعية ويسميها منكوفسكى باختصار «العالم» طبيعى أن تكون رباعية الأبعاد بالمعنى الزمانى - المكانى لأنها تتكون من حوادث فردية يعين كل منها أربعة أعداد هى بالأسم ثلاثة

إحداثيات مكانية س ، ص ، ش وإحداثي زماني ز . والعالم بهذا المعنى متصل لأنه توجد بالنسبة لكل حادثة حوادث مجاورة (واقعية أو على الأقل يمكن تخيلها) لا حصر لها إحداثياتها سَ ، صَ ، شَ ، زَ . وتختلف بقدر ضئيل جداً عن إحداثيات الحادثة الأولى س ، ص ، ش ، ز أما كوننا لم نتعود على النظر إلى العالم بهذا المعنى على أنه متصل رباعى الأبعاد فذلك راجع إلى أن الزمان كان يلعب فى الفيزياء قبل نظرية النسبية دوراً مختلفاً أو أكثر استقلالا إذا قورن بإحداثيات المكان، وهذا هو الأصل فى العادة التى جرينا عليها من اعتبار الزمان متصلا مستقلا . وفى الواقع يعتبر الزمن فى نظر الميكانيكا الكلاسيكية مطلقا بمعنى أنه مستقل عن موضع مجموعة الإسناد وحالتها من الحركة . ونرى تعبيراً عن هذا فى المعادلة الأخيرة من التحويل الجاليلى ز = زَ .

والنحو الرباعى الأبعاد فى تصور العالم هو الموضع الطبيعى فى نظرية النسبية حيث تجرد هذه النظرية الزمن من استقلاله . ويظهر هذا فى المعادلة الرابعة .

$$زَ = \frac{ز - \frac{ع}{حـ^{2}} س}{\sqrt{1 - \frac{ع^{2}}{حـ^{2}}}}$$

وفوق ذلك فإن الفرق الزمنى ىئ زَ لحادثتين بالنسبة إلى مَ لا يختفى عادة حتى ولو اختفى الفرق الزمنى ىئ ز لنفس هاتين الحادثتين بالنسبة إلى م . إن الفاصل المكانى الخالص لحادثتين بالنسبة إلى م ينتج فاصلا زمنيا لنفس الحادثتين بالنسبة إلى مَ . وليس هذا هو أهم اكتشافات منكوفسكى ، إذ أن اكتشافه الأهم يكمن فى الحقيقة فى تسليمه بأن المتصل الزمانى - المكانى الرباعى الأبعاد بالنسبة للنظرية النسبية يشبه شبهاً بعيداً فى خواصه الشكلية الأساسية المتصل المكانى الثلاثى الأبعاد للهندسة الإقليدية[1] وما علينا لإظهار هذا الشبه إلا أن نستبدل إحداثى الزمن العادى ز بالكمية الخيالية $\sqrt{-1}$ حـ ز المتناسبة معه . وبهذا تأخذ القوانين الطبيعية التى تطابق نظرية النسبية الخاصة الشكل الرياضى الذى يلعب فيه إحداثى الزمن نفس دور إحداثيات المكان الثلاث . وتناظر هذه الإحداثيات الأربع من حيث الشكل إحداثيات الهندسة الإقليدية المكانية الثلاث . ويجب أن يكون واضحاً حتى لغير الرياضيين أنه نتيجة لهذه الإضافة الشكلية البحتة إلى معلوماتنا اكتسبت النظرية بالطبع وضوحاً لاحد له .

إن هذه الملاحظات العابرة يمكن أن تعطى القارئ صورة ما عن الفكرة الهامة التى ساهم بها منكوفسكى والتى بدونها لما استطاعت النظرية النسبية العامة - وسندرس أسسها فيمايلى من الكتاب - أن توسع

(١) انظر شرح هذه المسألة بتفصيل أكبر فى الملحق الثانى .

مجـالها وأن يتـسع تطبيـقهـا إلى هذا الحد الشامـل . ولاشك أن أبحاث منكوفسكى صـعبة المنال على غـير الرياضيين ولكنه لما كـان يكفى لفهم الأفكار الأساسية لنظرية النسبية الخاصة والعامة إلماما خفيفاً بهذه الأبحاث فإنى سأتركـها الآن على أن لا أعود إليها إلا عند نهـاية الجزء الثانى من هذا الكتاب .

الجزء الثانى

نظرية النسبية العامة

الفصل الثامن عشر
نظريتا النسبية الخاصة والعامة

لقد كان المبدأ الأساسى الذى دارت حـوله كل الدراسات السابقة هو مبدأ النسبية الخاصة أى مبدأ النسبية الفيزيائية لكل حركة منتظمة . والآن دعنا مرة أخرى نحلل معناه بعناية ودقة .

لقد كان واضحاً فى جميع الأزمان أنه لا مندوحة - من حيث وجهة النظر التى تنقلها لنا - من اعتبار الحركة (كل حركة) حركة نسبية فقط . فـإذا عدنا إلى المثل الإيضـاحى الذى لجـأنا إليه كـثيراً - مـثل الطريق الحديدى وعربة الـقطار - فإننا نستطيع أن نعبـر عن حقيقـة الحركة التى تحدث هنا بالشكلين التاليين :

(أ) العربة فى حالة حركة بالنسبة إلى الطريق الحديدى .

(ب) الطريق الحديدى فى حالة حركة بالنسبة إلى العربة .

ويقوم فى (أ) الطريق الحديدى وفى (ب) عربة القطار مقام مجموعة الإسناد عند تقديرنا لحالة الحـركة لحادثة ما ، فإذا كان الأمـر ببساطة هو الكشف عن الحركة أو وصفها فلا أهمية من حيث المبدأ إلى أى مجموعة

إسناد نستند فهذا أمر كما سبق أن بينا واضح بنفسه للعيان ولكنه لا يجب الخلط بينه وبين النص الأكثر تعميما وشمولا والذى يسمى مبدأ النسبية الذى اتخذناه أساساً لأبحاثنا .

إن مبدأ النسبية لا ينص فحسب على أننا نستطيع أن نختار على السواء العربة أو الطريق كمجموعة إسناد لوصف أية حادثة (فهذا أيضاً واضح بنفسه للعيان) بل إنه فوق ذلك يؤكد على الأخص مايلى : أننا إذا صغنا القوانين الطبيعية العامة كما نحصل عليها بالتجربة باستعمال :

(أ) الطريق كمجموعة إسناد .

(ب) عربة القطار كمجموعة إسناد .

فإن هذه القوانين العامة (أى قوانين الميكانيكا وقانون انتشار الضوء فى الفراغ) يكون لها نفس الشكل فى كلتا الحالتين . ويمكن التعبير عن هذا على النحو التالى أيضاً : ليس لأى من مجموعتى الإسناد م ، مَ من حيث الملاءمة للوصف الفيزيائى للعمليات الطبيعية وضع فريد (أو حرفياً ليس لأى منهما ميزة خاصة) بالمقارنة بالمجموعة الأخرى . وعلى خلاف النص الأول فإن هذا النص الأخير ليس بالضرورة صحيحاً بداهة حيث إنه ليس مشمولا فى تصورى الحركة أو مجموعة الإسناد أو قابلا للاشتقاق منهما . بل إن التجربة وحدها هى التى يمكن أن تقرر صحته أو بطلانه .

ومع ذلك فإننا حتى الآن لم ندع أبداً تكافؤ جميع مجموعات الإسناد م لصياغة القوانين الطبيعية . فلقد كان كل ما ذهبنا إليه أقرب إلى مايلي :

في أول الأمر ابتدأنا بفرض أن هناك مجموعة إسناد م حالتها من الحركة تجعل القانون الجاليلي التالي صحيحاً بالنسبة لها : إذا عزلت إحدى الجسيمات المادية عزلاً كافيا عن بقية الجسيمات وتركت وشأنها فإنها تتحرك بحركة منتظمة في خط مستقيم . فكانت القوانين الطبيعية كأبسط ما يكون بالنسبة إلى م (مجموعة إسناد جاليلية) ولكن بالإضافة إلى م وجدنا أنه ينبغي أن نعطى كل مجموعات الإسناد نفس الأفضلية في هذا المعنى ؛ ولذلك يجب أن تكون هذه المجموعات مكافئة للمجموعة م من حيث الملاءمة لصياغة القوانين الطبيعية طالما كانت هذه المجموعات في حالة حركة منتظمة في خط مستقيم بالنسبة إلى م وليست في حركة دوران . وعلى ذلك تعتبر كل مجموعات الإسناد هذه مجموعات إسناد جاليلية . ولذلك كانت صحة مبدأ النسبية مفروضة بالنسبة لهذه المجموعات لا لغيرها (أى لتلك التى تتحرك بحركة مختلفة النوع) إن هذا هو المعنى الذى نقصده عندما نتكلم عن مبدأ النسبية الخاصة أو نظرية النسبية الخاصة .

أما الآن فعلى العكس من هذا نود أن نعطى « مبدأ النسبية العامة» النص التالى : « كل مجموعات الإسناد م و مَ . . . إلخ متكافئة من

حيث ملاءمتها لوصف الظواهر الطبيعية (صياغة القوانين الطبيعية العامة) مهما كانت حالتها من الحركة» ولكن قبل أن نمضى إلى أبعد من هذا يجدر بى أن أشير إلى أن هذه الصيغة هى الأخرى مؤقتة أيضاً وسيصبح من الواجب استبدالها فيما بعد بأخرى أكثر إطلاقاً وشمولا لأسباب ستتضح فى حينها .

ومنذ أن وضح أن مبدأ النسبية الخاصة له ما يبرره كان طبيعياً جداً أن يحس كل راغب فى فهم أوسع وأعم ميلا فى قرارة نفسه إلى التقدم قدماً نحو مبدأ النسبية العامة . ولكن اعتباراً بسيطاً له وزنه يوحى - على الأقل فى وضعنا الحالى - بأن الأمل فى نجاح هذه المحاولة ضعيف جداً تعترضه صعاب هائلة لابد من التغلب عليها أولا . والآن دعنا نتخيل أننا قد انتقلنا إلى عربة القطار التى تسير بسرعة منتظمة . إن المسافر فيها لا يشعر بحركتها طالما هى تتحرك بانتظام ولهذا السبب يستطيع دون غضاضة أن يفسر الأمر على اعتبار أن العربة ساكنة والطريق هو الذى يتحرك . وفوق ذلك فإننا نجد أن هذا التفسير تبعاً لمبدأ النسبية الخاصة صحيح أيضاً من وجهة النظر الفيزيائية .

ولكن إذا تغيرت الآن حركة العربة إلى حركة غير منتظمة بسبب «فرملة» شديدة مثلا فإن المسافر سيشعر فوراً مقابل ذلك بدفعة قوية إلى الأمام ، وسيترتب على انحباس هذه الحركة آثار أخرى تتناول الأجسام التى فى العربة مما سوف يشاهده المسافر فيها . وسوف يختلف ما يحدث

فى هذه الحالة عما حدث فى الحالة التى تأملناها أولا ؛ ولهذا السبب يبدو أنه من المستحيل أن تكون القوانين الميكانيكية السائدة بالنسبة إلى العربة التى تتحرك بحركة منتظمة أو الساكنة هى نفس القوانين التى تنطبق فى حالة العربة التى تتحرك بحركة غير منتظمة . وعلى أية حال فإنه واضح جداً أن القوانين الجاليلية لا تنطبق على العربة التى تتحرك بحركة غير منتظمة . ومن أجل هذا نشعر أننا مضطرون فى الوضع الحالى إلى أن نضفى نوعاً من الحقيقة الفيزيائية المطلقة على الحركة غير المنتظمة مما لا يتفق مع مبدأ النسبية العامة . ولكننا سنرى سريعاً أن هذا الرأى الشطط لا يمكن أن يفرض علينا طويلا إذ سنجد لنا منه مخرجا سهلا .

الفصل التاسع عشر

مجـــال الجاذبيـــــة

إذا التقطت حجـراً ثم تركته وشأنه فلمـاذا يسقط على الأرض . . .؟ إن الإجـابة المعـتادة عـلى هذا السـؤال هى أن الأرض تجذب الحـجـر . والفيزياء الحديثة تجيب إجابة مخـتلفة للأسباب الآتية : لقد أدت الدراسة المفصلة للظواهر الكهـرومغناطيسيـة إلى اعتبار أن التأثـير عن بعد - دون تدخل وسط ما بين الـطرفين - عملية مـستحـيلة ، فإذا جـذب مغناطيس قطعـة من الحديد مثـلا فإننا لا نكـتفى بأن نعـتبر أن مـعنى هذا هو أن المغناطيس يؤثر مباشرة على الحديـد خلال الفضاء الفارغ . ولكننا نضطر إلى أن نتخيل مع فرداى أن المغناطيس يخلق حوله شيئاً فيزيائياً حقيقياً - هو المجال المغـناطيسى يؤثر بدوره على قطعـة الحديد بحـيث يدفعـها إلى الحركة نحو المغناطيس . ولن نناقش هنا مـبررات هذه الفكرة العارضة ، وهى فى الحقيقة فكرة لا تخلو من التـعسف بوجه ما ، ولكننا نكتفى بأن نقـول إنه باستـخدام هذه الفكرة (فـكرة المجال) أمكن تفـسيـر الظواهر الكهرومغناطيـسية بطريقة أفضل بكثير مما لـو استبعدناها خصوصـاً فيما يتعلق بانتـشار الأمواج الكهـرومغناطيسيـة . وآثار الجاذبية أيضـاً تعامل بنفس الطريقة .

إن تأثير الأرض على الحجـر يحدث بطريقة غير مبـاشرة . فالأرض تخلق حولهـا مجالا جـاذبيا يؤثر على الحـجر مسـبباً سقـوطه . وتعلمنا التجربة أن شـدة التأثير على جسم ما تتناقص كلما ابتـعد هذا الجسم عن الأرض ، وذلك تبـعا لقـانون محـدد . وهذا يعنى من وجهـة نظرنا أن القانون الذي يحكم خواص مجال الجاذبية في الفضاء لابد أن يكون قانونا تام التـجديد حتى يتـحدد بالضبط تناقص الأثر الجاذبى تبعاً لبعد الأجسام المؤثرة . وهذا القانون قريب ممايلى : «إن الجسم (أى الأرض) يولد حوله فيما يجاوره مباشرة مجالا ويحدد شدة واتجاه هذا المجال فى النقط البعيـدة عن الجسم «القانون الذى يحدد خواص المجالات نفسها فى الفضاء» .

وعلى العكس من المجالات المغناطيسية والكهـربائية نجد أن مجالات الجاذبيـة تنفرد بميزة خاصـة على جانب أساسى من الأهمـية . «ذلك أن الأجسـام التى تتحرك تحت تأثيـر مجال الجاذبيـة فقط تتحـرك بعجلة لا تعتمد أبداً على الحالة المادية ولا الفيزيائية للجسم » . مثال ذلك أن قطعة الرصاص وقطعة الخشب تسقطان بنفس الكيفـية تحت تأثير مجال الجاذبية فى الفراغ سواء بدأ سقوطهما من حالة السكون أو ابتدآه بسرعة واحدة . ويمكن التعـبير عن هذا القانون الدقـيق بطريقة أخرى تبـعا لما يلى : إننا وفقاً لقـانون نيوتن للحركة نجد أن : القوة = (كـتلة القصور الذاتى) × العجلة حيث تكون كتلة القصور ثابتاً مميزاً للجسم المعجل . فإذا أصبحت الآن الجاذبية سبب العجلة نجد أن :

حيث كتلـة الجاذبية ثابت مميـز للجسـم . ومن هاتين المـعادلتين نجد أن :

$$\text{العجلة} = \frac{\text{كتلة الجاذبية}}{\text{كتلة القصور الذاتى}} \times \text{شدة مجال الجاذبية}$$

فإذا كانت العـجلة مستقلة عن طـبيعة الجسم وحـالته من السكون أو الحركـة كما هو ثابت بالتـجربة ، فعلى ذلك لابد أن تـكون هذه العجلة واحدة بالنسبة إلى كل الأجسام . وإذا اخـترنا الوحدات المناسبة أمكن أن نجعل هذه النسبة مسـاوية للوحدة . وبذلك نحصل على القانون : « كتلة الجاذبية لجسم ما مساوية لكتلة القصور الذاتى للجسم نفسه » .

صحيح أن هذا القانون المهم كان معروفاً من قبل فى الميكانيكا ولكن أحداً لم يفسره وقت ذاك ، ولا يمكن الوصول إلى تفـسير مرض له ما لم نسلم بالحقيـقية التالية : « إن خـاصيتى القصـور الذاتى والوزن لجسم ما (حرفيا الثقل) هما فى الحقيقة شىء واحد يبدو مرة بهذا الشكل والأخرى بالشكل الآخـر حسب الظروف . وسنرى فى الفـصل التالـى لأى مدى يتفـق هـذا مع الواقع وسنرى كيف ترتبـط هذه المسألة بفـرض النسبـية العامة .

الفصل العشرون
تساوى كتلتى القصور والجاذبية
كحجة فى صف المبدأ العام للنسبية

دعنا نتخيل حيزاً فارغاً قصياً ومنعزلاً عن النجوم وعن كل الكتل الأخرى ذات الحجم الذى يمتد به بحيث يتوافر لنا تقريباً فى هذا الحيز كل الشروط التى يتطلبها قانون جاليليو الأساسى . وعند ذلك سيكون ممكنا أن نختار مجموعة إسناد جاليلية لهذا الحيز (الجزء من العالم) ، وبالنسبة إلي هذه المجموعة ستستمر كل النقط الساكنة فى سكونها والنقط المتحركة كذلك ستستمر تتحرك فى حركة منتظمة فى خط مستقيم . دعنا نتخيل هذه المجموعة على هيئة قفص فسيح يشبه حجرة وبداخله راصد مزود بما يحتاج إليه من الأجهزة ، وطبعاً لا وجود للجاذبية بالنسبة إلى هذا الراصد بل إنه يجب عليه أن يربط نفسه بالحبال بأرضية القفص ، وإلا فإن أقل دفع على هذه الأرضية سيجعله يصعد ببطء نحو سقف القفص .

وقد ثبتنا وسط غطاء القفص من الخارج خطافاً مربوطاً به حبل . هب الآن أن كائناً (لا يعنينا هنا نوع هذا الكائن) بدأ يشد القفص من

الحبل بقوة ثابتــة عند ذلك سيبدأ القفص والراصد الذى فــيه فى الصعود إلى أعلى بحركة منتظمة العجلة ومع الزمن ستــصل سرعتهما إلى قدر لم يسمع به من قبل ما دمنا نرصد كل هذا من مجموعة إسناد أخرى لا تتأثر بأى دفع .

ولكننا نريد الآن أن نرى كـيف ينظر الرجل الذى فى القـفص إلى هذه العمليـة . إن عجلة القـفص ستنتقل إلى الرجـل عن طريق رد فعل أرضية القفص وينبغى عليه إذاً أن يتـحمل هذا الضغط على قدميه إذا كان لا يريد أن يرتمى بكامل قامته على أرضية القفص . إنه يقف فى القفص، بنفس الطريقة التى يقف بها أى إنسان فى حــجرة من حجرات منزل على الأرض. وإذا ترك هذا الرجل جـسماً كـان فى يده من قبل وشـأنه عندئذ سيتوقف انتقال العجلة إلى هذا الجسم وسيسقط نحو الأرضية بحركة نسبية ذات عجلة وسيقنع الراصد نفسه بعـد ذلك « أن مقدار سقوط الجسم نحو أرضية القـفص سيظل ثابتاً (مقـداراً واحداً دائماً) مهمـا كان نوع الجسم الذى يستخدمه فى التجربة .

واستناداً إلى ما يعلمه الرجل جـيد العلم عن المجال الجاذبى (وهو ما قد وضحناه فى الفصل السابق) سيصل سريعاً إلى هذه النتيجة :

«إنه والقفص واقعان فى مجال جاذبى ثابت على مر الزمن » وبديهى أنه سيـتعجب لحظة لماذا لا يســقط القفص فى هذا المجـال الجاذبى ولكنه ســيكتشف فـوراً الخطاف الذى يتوســط غطاء القفص والحـبل المربوط به

وسيـصل تبعـاً لذلك إلى أن القفص مـعلق فى حالة سكـون فى المجال الجاذبى .

هل يجدر بنا أن نسخـر من الرجل وأن نقول إنه يخطىء الظن وإن تصوره للموقف باطل . . . ؟ لست أعتـقد أنه يجوز لنا ذلك إذا كنا نريد أن نكون منصـفين ، بل ينبغى علينا أن نسلم بأنه سلك فـى فهم الموقف سلوكا لا يتعارض مع العقل أو القوانين الميكانيكية المعروفة . فعلى الرغم من أن القفص يتـحرك بعجلة بالنسـبة للحيز الجـاليلى الذى فرضناه أولا فإننا نسـتطيع مع ذلك اعتـبار القفص سـاكناً وهكذا يصبح لدينا أسـباب قوية لتوسيع مدى مبدأ النسبية حتى يشمل مجموعات الإستاد التى تتحرك بعجلة.



الفصل الحادى والعشرون
ما هى أوجه النقص فى أسس الميكانيكا الكلاسيكية ونظرية النسبية الخاصة ..... ؟

ذكرنا مراراً فى سياق ما تقدم أن الميكانيكا الكلاسيكية تبدأ من هذا القانون : « إن الجسيمات المادية المعزولة عن بعضها البعض عزلاً كافياً تستمر إما على الحركة المنتظمة فى خط مستقيم وإما على السكون» .

ولقد أكدنا مراراً أن هذا القانون الأساسى لا يمكن أن يكون صحيحاً إلا بالنسبة إلى مجموعات الإسناد (م) ذات حالات فريدة معينة من الحركة والتى فى حالة حركة انتقال منتظمة بالنسبة لبعضها البعض ، أما بالنسبة إلى مجموعات الإسناد الأخرى (م) فإنه غير صحيح . وعلى ذلك فإننا نفرق فى كل من الميكانيكا الكلاسيكية ونظرية النسبية الخاصة بين مجموعات الإسناد (م) التى يمكن أن يقال إن قوانين الطبيعة المعروفة تنطبق عليها وبين مجموعات الإسناد (م) التى لا تنطبق عليها هذه القوانين .

ولكن هذا الوضع لا يتفق وسلامة المنطق . إننا سرعان ما نتساءل كيف يكون لبعض مجموعات الإسناد (أو حالاتها من الحركة) أفضلية على بقية المجموعات (أو حالاتها من الحركة) . . . ؟ ولماذا كان هذا التفضيل . . . ؟ ولكى أوضح جيداً معنى هذا السؤال دعنى أضرب لك مثلا :

هب أننى أقف أمام موقد غازى على جانبيه قدران متشابهان لا تميز العين بينهما ، وكلاهما ملىء حتى منتصفه بالماء وأنى أشاهد البخار يتصاعد باستمرار من أحدهما دون الآخر لا شك فى أن ذلك سيكون مدعاة للعجب حتى ولو لم أكن قد رأيت موقداً غازياً وقدرا من قبل ، ولكن لو أنى لا حظت وجود شيء أزرق اللون تحت القدر الأول دون الآخر لما كان هناك داع للاستغراب حتى ولو لم أكن قد رأيت شعلة غاز من قبل لأننى سوف أستطيع أن أقول إن هذا الشيء الأزرق هو السبب فى تصاعد البخار أو على الأقل يحتمل ذلك . وكان حريا بى أن أظل حائراً لو لم أكتشف هذا الشيء الأزرق اللون تحت أحد القدرين إذا كان سيتعين علىّ عندئذ أن أحاول اكتشاف ظرف آخر أسند إليه تصاعد البخار من أحد القدرين دون الآخر .

وبالمثل فإننا نسعى إلى اكتشاف شيء حقيقى فى الميكانيكا الكلاسيكية (أو فى نظرية النسبية الخاصة) نسند إليه اختلاف سلوك

مجمـوعات الإسناد م . لقد أدرك نيوتن هذا النقص وحـاول التغلب عليه ولكنـه فـشل فـى ذلك . ولكن مـاك أدركه إدراكـاً أوضح مـن الجمـيع ولهـذا طالب بإلحـاح بأن توضع الميكانـيكا على أسس جـديدة ولا يمكن تلافى هذا النقص إلا فى فـيزياء تتفق ومـبدأ النسـبية العـامة فمـعادلات نظـرية النسبية تنطبق على جميع مجموعات الإسناد أياً كانت حالتها مـن الحركة .

الفصل الثانى والعشرون

استنتاجات قليلة من مبدأ النسبية العامة

لقد رأينا فى الفصل العشرين كيف أن مبدأ النسبية العامة يضعنا فى موقف نستطيع معه أن نشتق صفات المجال الجاذبى بطريقة نظرية محضة. ولنفرض مثلا أننا نعرف كيفية حدوث عملية طبيعية ما ، زماناً ومكانا فى حيز جاليلى بالنسبة إلى مجموعة إسناد جاليلية م . إننا نستطيع بطريقة نظرية محضة (أى بمجرد الحساب) أن نحدد كيف تبدو نفس هذه العملية الطبيعية بالنسبة إلى مجموعة الإسناد مَ التى تتحرك بعجلة بالنسبة إلى مجموعة الإسناد م . وحيث إنه يوجد بالنسبة لهذه المجموعة الجديدة مَ مجال جاذبى فإننا نستطيع أيضاً على ذلك أن نحدد أثر هذا المجال على العملية موضوع الدراسة .

هب أننا نعلم أن جسماً يتحرك بحركة منتظمة فى خط مستقيم بالنسبة إلى مجموعة الإسناد م (تبعاً لقانون جاليليو) فإنه يتحرك بعجلة فى خط منحن بالنسبة إلى مجموعة الإسناد مَ التى تتحرك بعجلة (القفص) وهذه العجلة أو الانحناء تقابل تأثير المجال الجاذبى فى مَ على الجسم المتحرك ومن المعروف أن مجال الجذب يؤثر على حركة

الأجسام بهذا الشكل وعلى ذلك تكون هذه الأفكار لا جديد فيها .

ولكننا إذا طبقنا مثل هذه الأفكار على شعاع الضوء حصلنا على نتائج جديدة على قدر أساسى من الأهمية فمثل هذا الشعاع ينتقل بالنسبة إلى مجموعة الإسناد الجاليلية م بالسرعة حـ فى خط مستقيم ومن السهل أن نرى أن مسار الشعاع لا يصبح خطاً مستقيماً بالنسبة إلى مجموعة الإسناد مَ التى تتحرك بعجلة . ومن هذا نستخلص الآتى : « تنتشر أشعة الضوء بوجه عام فى خطوط منحنية فى المجال الجاذبى» . ولهذه النتيجة وجهان على جانب كبير من الأهمية :

أولاً : أنه يمكن التحقق منها عملياً على الرغم من أن الدراسة النظرية التفصيلية أظهرت أن أنحناء الضوء الذى تستوجبه أو تكشف عنه نظرية النسبية ضئيل جداً بالنسبة إلى مجالات الجاذبية التى فى متناول أيدينا عملياً . ولكن مقداره بالنسبة للشعاع الذى يمر ملامساً للشمس يبلغ ١,٧ ثانية من القوس وهذا يمكن الاستدلال عليه بالطريقة التالية : بعض النجوم الثابتة تبدو لمن يرصدها من فوق الأرض من مجاورة الشمس ، وعلى ذلك يمكن رصدها فى أثناء الكسوف الكلى للشمس وفى مثل هذه الفترات يجب أن تبدو هذه النجوم كأنها بعدت عن

الشمس بالقدر السابق ذكره بالمقارنة مع موضعها الظاهرى حينما تكون الشمس فى مكان آخر من السماء ، والتحقق من صحة أو خطأ هذا الاستنتاج مسألة على جانب كبير من الأهمية وحلها العاجل منوط بالفلكيين[١] .

ثانياً : تثبت هذه النتيجة أنه تبعاً للنظرية العامة للنسبية لا يمكن أن تكون صحة قانون ثبوت سرعة انتشار الضوء فى الفراغ (وهو أحد الفرضين الأساسيين فى نظرية النسبية الخاصة والذى رجعنا إليه مرارا) بلا حدود . لأن انحناء أشعة الضوء لا يمكن أن يحدث إلا إذا تغيرت سرعة انتشاره مع موقعه . والآن قد نتوهم أنه تبعاً لذلك تكون نظرية النسبية الخاصة ومعها نظرية النسبية بأكملها قد تمرغت فى التراب مع أن هذا فى الواقع ليس صحيحاً . إنه لا يثبت إلا أن صحة النسبية الخاصة محدودة الأفق وأن نتائجها صحيحة فيما يتعلق بالظواهر التى يمكن أن نهمل أثر المجال الجاذبى فيها وحدها (أى الضوء) .

لما كان كثير من المعارضين للنظرية النسبية يحتجون بأن نظرية النسبية العامة تتعارض مع نظرية النسبية الخاصة فإنه من المفيد لتوضيح حقائق

---

(١) لقد ثبت انحراف الضوء بالقدر الذى تحدده النظرية بوساطة تصوير النجوم الذى قامت به بعثة أرسلتها الجمعية الملكية والجمعية الملكية للفلك أثناء كسوف الشمس فى ١٩١٩/٥/٢٩ (أنظر الملحق الثالث) .

هذا الموضوع أن نضرب لذلك مثلا مناسباً . لقد كنا قبل تقدم الديناميكا الكهربية ننظر إلى قوانين الكهرباء والإستاتيكية على أنها قوانين الكهرباء عموماً ولكننا الآن نعلم جميعاً أن المجالات الكهربائية يمكن اشتقاقها اشتقاقا صحيحاً من الاعتبارات الإستاتيكية فى حالة واحدة فقط وهى حالة لا تتحق أبداً تماماً وهى تلك التى تكون الكتل الكهربائية فيها ساكنة تماماً بالنسبة إلى بعضها البعض وبالنسبة إلى مجموعة الإسناد فهل نكون على حق إذا قلنا استناداً إلى هذا إن معادلات المجالات فى الديناميكا الكهربائية لماكسويل تتعارض مع الإستاتيكا الكهربائية، طبعاً لا لأن الإستاتيكا الكهربائية حالة خاصة من الديناميكا الكهربائية، فقوانين الأخيرة تؤدى إلى قوانين الأولى فى حالة عدم تغير المجالات مع الزمن .

وليس هناك لأية نظرية فزيائية مصير أسعد من أن تصبح هى نفسها لبنة فى بناء نظرية أوسع منها تعيش هى فيها كحالة محدودة خاصة .

وفى مثل انتقال الضوء الذى سقناه رأينا أن نظرية النسبية العامة تمكننا من أن نشتق نظرياً أثر مجال الجاذبية على العمليات الطبيعية التى نعرف قوانينها فى حالة عدم وجود مجال الجاذبية مقدما . ولكن المشكلة التى تلفت النظر أكثر من غيرها والتى تهدينا نظرية النسبية العامة إلى مفتاح حلها هى المشكلة التى تتعلق بالبحث عن القوانين التى يخضع لها مجال الجاذبية نفسه . ودعنا الآن نتأمل ذلك لحظة .

إننا على علم تام بمناطق الزمان - مكان التى تخضع بصفة تقريبية

للطريقة الجاليلية متى اخترنا مجموعة الإسناد المناسبة . وهذه هى النواحى التى تختفى فيها المجالات الجاذبية . فإذا أسندنا الآن ناحية منها إلى مجموعة الإسناد مَ التى تتحرك بأى نوع من الحركة فإنه ينشأ عن ذلك بالنسبة إلى مَ مجال للجاذبية يتغير بتغير الزمان والمكان[1] وطابع هذا المجال سيتوقف طبعاً على الحركة التى نختارها للمجموعة مَ . وتبعاً لنظرية النسبية العامة يجب أن ينطبق القانون العام للمجالات الجاذبية على المجالات الى نحصل عليها بهذه الطريقة . وعلى الرغم من أنه ليس هناك وسيلة للحصول على كل المجالات الجاذبية بهذا الشكل يجب مع ذلك أن نتمسك بأمل استخلاص قانون الجذب العام من مثل مجال الجاذبية هذا . ولقد تحقق هذا الأمل على أكمل وجه ولكن كان علينا مقدماً أن نتغلب على مشكلة كبرى تتصل بأعمق طبائع الأشياء وإننى لا أستطيع أن أخفيها عن القارىء أكثر من هذا . إننا فى أمس الحاجة إلى أن نوسع دائرة أفكارنا عن المتصل الزمكانى إلى مدى أبعد مما بلغناه حتى الآن .

(١) أن هذا ناتج من تعميم الفكرة التى نوقشت فى الفصل العشرين .

الفصل الثالث والعشرون
سلوك الساعات وقضبان القياس
على مجموعة إسناد تدور

لقد تجنبت عامـداً حتى الآن الكلام عن التفسيـر الفيزيائى لمدلولات الزمان والمكان فى حالة نظرية النسبية العـامة وعلى ذلك فإننى مسئول عن هذا التقصير خصوصاً والأمـر الذى نحن بصدده كما تعلمنا نظرية النسبية الخاصة أشد ما يكون عمـقاً وأهمية ولقد آن الأوان لكى نصحح هذا الخطأ ونسـتكمل هذا النقص ، وأبـادر بالقـول إن هذا لن يكون بالأمـر الهين بالنسبة إلى القارىء إذ سيتطلب منه صبرا جميلا وتأملا عميقاً وقدرة فائقة على التجريد .

ولنبدأ مـرة أخرى بحالات خاصـة طالما لجأنا إليهـا من قبل . دعنا نتخيل حيزاً من الزمان - مكان ليس به مجال جاذبى بالنسبة إلى مجموعة الإسناد م التى اخترنا لها حالة مناسبة من الحركة . وفى هذه الحالة تكون م مجموعـة إسناد جاليلية بالنسبة إلى هذا الحيز تنطبـق عليها نتائج نظرية النسبية الخاصة . والآن دعنا نتخيل نـفس الحيز وقد أسندناه إلى مجموعة إسناد أخرى مَ تدور بانتظام بالنسبة إلى المجموعة م ، ولكن نحدد أفكارنا

ونوضحها دعنا نتخيل مَ على شكل قرص مستو يدور فى مستواه حول مركزه . فإذا كان هناك راصد على حافة هذا القرص فإنه سوف يحس بتأثير قوة طاردة فى اتجاه نصف قطر القرص قد يفسرها راصد كان فى حالة السكون بالنسبة إلى مجموعة الإسناد م على أنها من تأثير القصور الذاتى (قوة الطرد المركزية) ولكن الراصد الذى على القرص قد يعتبر هذا القرص مجموعة إسناد « ساكنة » وهو على أساس مبدأ النسبية العامة لا تنقصه المبررات ليفعل ذلك وتكون القوة التى تؤثر عليه وعلى كل الأجسام الأخرى الساكنة بالنسبة إلى القرص راجعة فى اعتباره إلى تأثير مجال جاذبى . ومع ذلك فإن التوزيع المكانى (فى المكان) لهذا المجال الجاذبى من نوع يستحيل تحقيقه على أساس نظرية نيوتن للجاذبية[1] ولكن هذا لا يزعج الراصد الذى يؤمن ويتمسك بنظرية النسبية العامة فهو مصيب حينما يعتقد أنه من الممكن صياغة قانون عام للجاذبية لا يفسر فحسب حركات النجوم تفسيراً سليماً بل يفسر أيضاً مجال القوة التى يتعرض لها فى هذه التجربة .

ويجرى الراصد تجاربه على قرصه الدائرى مستعملا الساعات وقضبان القياس وهو حين يفعل ذلك يهدف إلى أن يصل إلى تعاريف مضبوطة لمعنى مدلولات الزمان والمكان بالنسبة إلى القرص الدائرى مَ على أساس ملاحظاته فما عساه فاعل فى هذا المضمار . . . . ؟

(١) ان المجال يختفى عند مركز القرص ويزيد زيادة مضطردة تتناسب مع البعد عن المركز كلما تقدمنا إلى الخارج .

إنه أولاً سيضع ساعتين متماثلتين فى التركيب واحدة عند مركز القرص والأخرى عند حافته بحيث تكونان ساكنتين بالنسبة للقرص . ونحن الآن نتساءل هل ستجرى الساعتان بمعدل واحد من وجهة نظر (أى بالنسبة إلى الراصد على) مجموعة الإسناد الجاليلية التى لا تدور م . . ؟ إننا نجد أنه بالنسبة إلى هذا المرجع ستكون الساعة التى فى المركز ثابتة لا سرعة لها بينما حصلنا عليها فى الفصل الثانى عشر نجد أن الساعة الأخيرة ستكون أبطأ بصفة دائمة من الساعة التى عند مركز القرص الدائرى كما يراها الراصد على م ، وواضح أن راصداً على القرص بجانب الساعة التى عند المركز سيرى نفس الشىء . وهكذا ستكون الساعة على قرصنا الدائرى أو فى كل مجال جاذبى وذلك لجعل الحالة أكثر شمولاً - أسرع أو أقل إسراعاً تبعاً للموضع الذى توضع فيه الساعة (فى حالة السكون) . ولهذا السبب يستحيل علينا أن نحصل على تعريف معقول للزمن بوساطة ساعات ضبطت وهى فى حالة السكون لمجموعة الإسناد . وتواجهنا صعوبة مماثلة عندما نحاول أن نطبق تعريفنا السابق للآنية فى مثل هذه الحالة . ولكننى لا أريد أن أخوض فى هذا الموضوع إلى أبعد من هذا .

وفوق ذلك يثير أمامنا - فى هذا الطور - تعريف إحداثيات المكان أيضا صعوبات لا يمكن التغلب عليها . فإذا طبق الراصد قضبان قياسه العيارية (قضيب قياس قصير إذا قورن بنصف قطر القرص) مماسة لحافة القرص فإن طول هذا القضيب بالنسبة إلى راصد على مجموعة الإسناد

الجاليلية سيكون أقل من الواحد الصحيح لأن الأجسام المتحركة تعانى - تبعا للفصل الثانى عشر - قصراً فى اتجاه الحركة . ومن الناحية الأخرى لا يعانى قضيب القياس قصرا فى طوله كما يبدو من م إذا طبق على القرص فى اتجاه نصف قطره . وإذا قاس الراصد أولا محيط القرص بقضيب قياسه ثم قاس قطره فإنه إذا قسم نتيجتى القياس الواحدة على الأخرى لن يحصل كخارج للقسمة على العدد المعتاد ط = ٣,١٤ بل على عدد أكبر[١] بينما يكون ناتج هذه العملية طبعا بالنسبة إلى قرص ساكن بالنسبة إلى م هو ط بالضبط وهذا يثبت أن قضايا هندسة إقليدس لا تنطبق تماماً على القرص الدائر ولا على المجال الجاذبى بصفة عامة على الأقل إذا اعتبرنا طول قضيب القياس هو الواحد الصحيح فى كل الأوضاع والاتجاهات . ومن هذا تفقد فكرة الخط المستقيم أيضاً معناها . ولسنا على ذلك فى وضع نستطيع معه أن نعرِّف بدقة الإحداثيات س . ص . ش بالنسبة للقرص بوساطة الطريقة التى اتبعناها فى أثناء دراسة نظرية النسبية الخاصة وطالما كما لا نستطيع تحديد إحداثيات أمكنة وأزمنة الحوادث فإننا بالتالى لا نستطيع أن نعطى معنى دقيقا للقوانين الطبيعية التى تذكر فيها هذه الإحداثيات .

---

(١) علينا أن نستعمل خلال هذا البحث مجموعة الاسناد الجاليلية غير الدوارة لأننا نستطيع التسليم إلا بصحة نتائج نظرية النسبية الخاصة بالنسبة إلى م (فبالنسبة إلى مَ يسود المجال الجاذبى) .

وهكذا تبدو كل استنتاجاتنا السابقة القائمة على النسبية العامة موضع تساؤل ومرجع هذا فى الحقيقة إننا أصبحنا فى أمس حاجة إلى الالتجاء إلى حركة التفاف بارعة حتى نستطيع أن نطبق مبدأ النسبية العامة تطبيقاً صحيحاً وسأعد القارئ بذلك فى الفصول التالية .

الفصل الرابع والعشرون
المتصل الإقليدى واللاإقليدى

تخيل أيها القارىء العزيز أن سطح مائدة رخامية قد بسط أمامنا . إننا نستطيع أن ننتقل من أية نقطة على هذه المائدة إلى أية نقطة أخرى عليها بأن نتسلل باستمرار من نقطة إلى نقطة «مجاورة» ونستطيع تكرار هذه العملية ما شئنا . وبعبارة أخرى نقول أننا نستطيع الانتقال دون أن نقوم بأية «قفزات» وإنى واثق أن القارىء يقدر بوضوح تام ما أقصده هنا بلفظى « مجاورة » و « قفزات » ما لم يكن متعنتاً فوق ما ينبغى . ونحن نعبر عن هذه الخاصة للسطح بأن نصفه بأنه متصل .

دعنا نتخيل الآن أن لدينا عدداً كبيراً من القضبان الصغيرة متساوية الطول وأن طولها صغير بالمقارنة بأبعاد قطعة الرخام ، وأعنى حينما أقول متساوية الطول أننا إذا طبقناها الواحد على الآخر تقابلت كل أطرافها تماماً . ثم دعنا ندع أربعة من هذه القضبان على المائدة الرخامية بحيث تكوّن فيما بينها شكلا رباعياً (مربعاً) قطراه متساويان طولا . ولكى نتأكد من تساوى القطرين نستعمل قضيب اختبار قصير . ثم دعنا نضيف إلى هذا المربع مربعات متشابهة كل منها يشترك مع المربع الأول فى

قضيب . ثم نوالى القيام بهذه العملية مع كل المربعات حتى تغطى أخيراً كل القطعة الرخامية تماما بالمربعات وهذا الترتيب يجعل كل جانب من أى مربع مشتركا بين مربعين وكل ركن مشتركاً بين أربعة مربعات .

وسيكون مدعاة للعجب حقا أن نستطيع الاستمرار فى هذه العملية دون أن تكتنفنا الصعاب وما علينا إلا أن نفكر فيمايلى : إذا تقابلت فى أية لحظة ثلاثة مربعات فى ركن فإن جانبين من المربع الرابع يكونا قد وضعا ويكون تبعاً لذلك وضع الجانبين الآخرين قد تحدد تماما ، ولكننى الآن لم أعد قادراً على ضبط الشكل الرباعى بحيث أن يتساوى قطراه فإذا جاءا متساويين تلقائياً فهذه منحة خاصة تهيئها خواص المائدة الرخامية وقضبان القياس لا أملك حيالها إلا الدهشة شاكراً ، ولابد لنا من كثير من أمثال هذه المفاجئات إذا كان لابد من نجاح التركيب .

وإذا مر كل شىء بسلام فإننى يحق لى أن أقول عند ذلك إن نقط المائدة الرخامية متصل إقليدى بالنسبة إلى قضبان القياس التى استعملت «كمسافة» (فترة - خطية) وإنى إذا أخذت ركناً من مربع واعتبرته «أصلا» أو نقطة إبتداء فإنى أستطيع أن أصف وصفاً تحديدياً كل ركن آخر لاى مربع ما بالنسبة إلى هذا الأصل بوساطة عددين ، فما علىّ إلا أن أذكر عدد القضبان التى يجب أن أمر فوقها ابتداء من الأصل أولا يميناً ثم إلى أعلى بعد ذلك حتى أصل إلى الركن موضع الاعتبار . وهذان العددان

يكونان عند ذلـك «الإحداثيـين الكارتيـزيين» لهـذا الركن بالنسـبـة إلى «مجموعة الإسناد الكارتيزية» التى يحددها ترتيب قضبان القياس .

ونحن إذا حورنا هذه التجربة المجردة التـحوير التالى اهتدينا إلى أنه لابد هناك حالات لا تنتـهى فيـها التجـربة بالنجاح . سوف نتـصور أن القضـبان تتمدد بمقـدار يتناسب مع زيادة درجة حرارتهـا ثم نسخن وسط المائدة الرخامـية دون أطرافها فـفى هذه الحالة يمكن أن يظل قضيـبان من قضبـان القياس متطابقين فى كل موضع على المـائدة ولكن التركيب الذى أنشأناه من المربـعات لابد وأن يضطرب فى أثناء التـسخين لأن القضـبان التى على وسط المائدة تتمدد بينما تظل تلك التى على الأطراف بلا تمدد .

وبالنسبة إلى قضبان القياس التى أعتبرناها - وحدة الأطوال - لا تعود المائدة الرخامية متصلا إقليـدياً ولا نعود نحن أيضاً فى وضع نستطيع معه تحديد الإحداثيات الكارتيزية مباشرة بوساطتها، ولكنه لما كان هناك أجسام أخرى لا تؤثر عليهـا درجة حرارة المائدة على نحو ما أثرت على قـضبان القياس (وربما لا تتـأثر إطلاقاً) لذلك قد يكون ممكنا أن نتمـسك بوجهة النظر التى تعتبر المائدة «متـصلا إقليدياً» ويمكننا الوصول إلى هذا وبطريقة مرضية لو أننا أجرينا تعويضاً بارعاً فى عملية قياس أو مقارنة الأطوال .

ولكن إذا كانت القضبان من جـميع الأنواع (أى من جميع الأجسام) تسلك جميعها على قطعة الرخام متفاوتة التسخين فيما يتعلق بتأثير الحرارة عليها نفس السلوك ، وإذا لـم يكن لدينا أية وسيلة لبيان تأثير الحرارة غير

السلوك الهندسى لقضبان القياس فى التجارب المماثلة للتجربة التى تقدم وصفها فإن الخطة المثلى لدراسة سطح المائدة هى أن نطلق اسم المسافة واحدة» على نقطتين على السطح ما دام يمكن أن نجعل نهايتى قضيب من قضبان القياس تنطبقان على هاتين النقطتين لأنه ليس أمامنا وسيلة أخرى حتى نتفادى أن تكون العملية تعسفية إلى أبعد مدى . وعلى ذلك يجب أن نسقط طريقة الإحداثيات الكارتيزية وأن نبحث عن طريقة أخرى لا تفترض صحة هندسة إقليدس بالنسبة إلى الأجسام الجاسئة[1] ويلاحظ القارىء أن هذا الموقف يناظر الموقف الذى أدى إليه المبدأ العام للنسبية فى الفصل الثالث والعشرين .

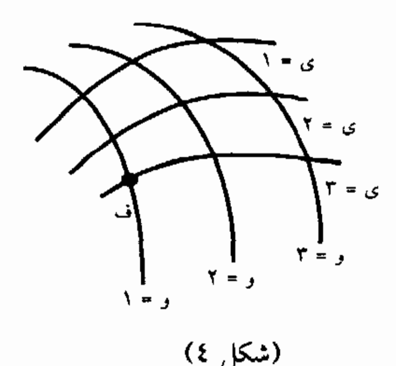
---

(١) الوضع الرياضى لهذه المشكلة هو . إذا كان لدينا مسطح ما (بيضاوى مثلا) فى فضاء اقليدى ثلاثى الأبعاد فانه يوجد لهذا السطح هندسة ثنائية الأبعاد كما يوجد بالنسبة للمستوى . ولقد قام جاوس بمعالجة هذه الهندسة الثنائية الابعاد من المبادىء الأولى دون أن يلجأ إلى حقيقة كون السطح يتعلق بمتصل اقليدى ثلاثى الأبعاد فإذا تخيلنا أننا نقيم انشاءات بوساطة قضبان جاسئة فى السطح (مشابهة لتلك التى أقمناها فى السطح الرخامى) فإننا سنجد أن القوانين التى تنطبق على هذه الانشاءات تختلف عن القوانين التى تؤدى إليها هندسة اقليدس المستوية فليس السطح متصلا اقليديا بالنسبة إلى قضبان القياس ولا نستطيع تعيين الاحداثيات الكارتيزية فى السطح . ولقد أوضح جاوس المبادىء التى يمكن تبعا لها معالجة العلاقات الهندسية على السطح وهكذا اوضح معالم الطريق إلى طريقة **ريمان** فى معالجة المتصلات اللاإقليدية متعددة الأبعاد . وهكذا كان الرياضيون هم الذين حلوا منذ أمد بعيد المشكلات الشكلية التى يقودنا إليها مبدأ النسبية العامة .

الفصل الخامس والعشرون

إحداثيات جاوس

يرى جـاوس أن الوسيلة التـى تجمع بين التـحليل والهندسـة والتى تصلح لعـلاج المشكلة يمكن بلوغـهـا على النحو الآتـى : لذلك نتخـيل مجـموعـة من المنحنيات الاختـيارية (انظر الشكل ٤) رسـمت على سطح المائدة ونـسميـها المنحنيات (ى) ونشير إلى كل منها بعـدد وقد رسمنا فى



(شكل ٤)

الشكل التوضيـحى المنحنيات ى = ١ ، ى = ٢ ، ى = ٣ ، ويجب أن نتـخيل بـين المنحنيين ى = ١ ، ى = ٢ عـدداً لا نهائيـاً من المنحنيـات

مرسوماً ، وجميعها تناظر الأعداد الحقيقية الواقعة بين ٠ ، ١ وبذلك نحصل علي نظام من المنحنيات ى . وهذا النظام المتناهى الكثافة يغطى سطح المائدة كله وهذه المنحنيات ى يجب أن لا تتقاطع مع بعضها البعض ، ويجب ألا يمر بالنقطة الواحدة من السطح إلا منحنى واحد وواحد فقط . وهكذا يكون لكل نقطة على السطح قيمة (ى) محددة تماماً . وبالمثل يمكن أن نتخيل نظاماً من المنحنيات (و) مرسوماً على السطح وهو يخضع لجميع شروط المنحنيات ى فهو مزود بأعداد بطريقة مماثلة ويمكن أيضاً أن يكون شكله اختيارياً . ويتبع ذلك أن يكون لكل نقطة على سطح المائدة قيمة (ى) وقيمة (و) ويسمى هذان العددان إحداثى سطح المائدة (الإحداثيات الجاوسيان) فالنقطة ف مثلا فى الشكل التوضيحى لها الإحداثيان ى = ٣ ، و = ١ ، وتقابل النقطتان المتجاورتان ف ، فَ على السطح الإحداثيات :

ف : ى ، و

فَ : ى + ء ى ، و + ء و

حيث يعنى ء ى ، ء و عددين صغيرين جداً . وبنفس الطريقة نستطيع أن نشير إلى المسافة (الفترة - الخطية) بين ف ، فَ مقيسة بقضيب القياس بوساطة العدد الصغير جداً ، ء ط وقد وجد جاوس أن :

$$ء ط^{٢} = ل_{١١} ء ى^{٢} + ٢ ل_{١٢} ء ى ء و + ل_{٢٢} ء و^{٢}$$

حيث $ل_{١١}$ ، $ل_{١٢}$ ، $ل_{٢٢}$ مقادير تعتمد بطريقة محددة جداً على ى ، و والمقادير $ل_{١١}$ ، $ل_{١٢}$ ، $ل_{٢٢}$ تحدد سلوك القضبان بالنسبة للمنحنيات (ى) والمنحنيات (و) وبالتالى بالنسبة لسطح المائدة أيضاً . وفى الحالة التى تكوِّن فيها نقط السطح محل الاعتبار متصلا إقليدياً بالنسبة إلى قضبان القياس يمكن رسم المنحنيات ى ، المنحنيات و وربط أعداد بالنسبة لها وفق المعادلة :

$$ء ط^{٢} = ء ى^{٢} + ء و^{٢}$$

وبهذه الشروط تكون المنحنيات ى ، و خطوطا مستقيما بالمعنى الإقليدى وتكون متعامدة مع بعضها البعض ، وتكون إحداثيات جاوس هنا إحداثيات كارتيزية بكل بساطة . ومن الواضح أن إحداثيات جاوس ليست أكثر من ارتباط مجموعتين من الأعداد مع نقط السطح موضع الاعتبار بحيث تكون القيم العددية التى تختلف فيما بينها اختلافاً ضئيلا مرتبطة بالنقط المتجاورة « فى المكان» .

وحتى الآن كنا نطبق هذه الأفكار على متصل ثنائى الأبعاد ولكن طريقة جاوس هذه يمكن أن تطبق بسهولة على متصل ثلاثى الأبعاد أو رباعيها أو حتى أكثر من ذلك فإذا كان ممكنا الحصول على متصل رباعى الأبعاد فإننا يمكن أن نصوره بالطريقة الآتية : نربط بطريقة اختيارية كل نقطة من نقط هذا المتصل بأربعة أعداد $س_{١}$ ، $س_{٢}$ ، $س_{٣}$ ، $س_{٤}$ وتعرف بالإحداثيات ويقابل النقط المتجاورة قيم متقاربة للإحداثيات فإذا كانت

المسافة ء ط مرتبطة بالنقطتين المتجاورتين ف ، ف وهى قابلة للقياس والتحديد فيزيائياً فإن المعادلة التالية تكون صحيحة :

$$ء ط^{2} = ل_{11} ء س_{1}^{2} + 2 ل_{12} ء س_{1} ء س_{2} + \cdots\cdots + ل_{44} ء س_{4}^{2}$$

حيث تكون المقادير $ل_{11}$ ... إلخ قيماً تتغير مع الموقع فى المتصل . ولا يمكن أن نربط الإحداثيات $س_{1}$ ... $س_{4}$ مع نقط المتصل بحيث يصبح لدينا ببساطة :

$$ء ط^{2} = ء س_{1}^{2} + ء س_{2}^{2} + ء س_{3}^{2} + ء س_{4}^{2}$$

إلا إذا كان المتصل إقليدياً . وفى هذه الحالة تظل العلاقات فى المتصل الرباعى قائمة على النحو الذى تقوم عليه فى قياساتنا الثلاثية الأبعاد .

ومع ذلك فليست معالجة جاوس للمقدار ء $ط^{2}$ التى أوضحناها عاليه ممكنة دائما إذ يقتصر ذلك على الحالات التى نضع فيها موضع الاعتبار مناطق من المتصل صغيرة بدرجة تكفى لاعتبارها متصلات إقليدية . وهذا مثل ينطبق بوضوح على حالة المائدة الرخامية ذات التغير المحلى لدرجة الحرارة (متفاوتة التسخين) فإن درجة الحرارة ثابتة عملياً بالنسبة إلي جزء صغير من المائدة ، وهكذا يكون السلوك الهندسى لقضبان القياس تقريبياً كما يجب أن يكون وفق قواعد هندسة إقليدس ، ومن هنا نرى لماذا كان

الخلل فى إنشاء المربعات فى الفصل السابق لا يتضح جلياً إلا إذا امتد هذا الإنشاء فوق جزء كبير من سطح المائدة .

يمكننا أن نلخص ما تقدم فيمايلى : لقد اخترع جاوس طريقة نستطيع بها معالجة المتصلات عموما علاجا رياضياً وهذه الطريقة تحدد علاقات الحجم أو الكم («المسافات » بين النقط المتجاورة) بأن تختص كل نقطة فى المتصل بعدد من الأعداد يساوى ما له من الأبعاد ويتم ذلك بشكل يجعل للمخصصة معنى واحداً ويجعل الأعداد (الإحداثيات الجاوسية) التى تخصص لنقط متجاورة تختلف فيما بينها بمقادير متناهية فى الصغر . ومجموعة الإحداثيات الجاوسية تعميم منطقى لمجموعة الإحداثيات الكارتيزية ويمكن تطبيقها أيضاً على المتصلات اللاإقليدية وذلك فقط عندما تسلك - من حيث الحجم أو المسافة المحددان - الأجزاء الصغيرة من المتصل محل الاعتبار سلوكاً يشبه النظام الإقليدى - وذلك كلما صغر الجزء من المتصل الذى نطبقها عليه .

الفصل السادس والعشرون
المتصل الزمان والمكان فى نظرية النسبية الخاصة
على إعتبار انه متصل إقليدى

إننا الآن فى وضع نستطيع معه أن نصوغ فكرة منكوفسكى التى أشرنا إليها مجرد إشارة عابرة فى الفصل السابع عشر بدقة أتم . لقد رأينا أنه تبعاً لنظرية النسبية الخاصة تَفضُلُ بعض مجموعات الإسناد من حيث الملاءمة لوْصف المتصل الزمان والمكان الرباعى الأبعاد غيرها . ولقد سمينا هذه المجموعات المفضلة مجموعات إسناد جاليلية . ولقد أوضحنا فى الجزء الأول من هذا الكتاب تفصيلا التعريف الفيزيائى للإحداثيات الأربعة س ، ص ، ش ، ز التى تحدد الحادثة أو بعبارة أخرى النقطة فى المتصل رباعى الأبعاد . وفى حالة الانتقال من مجموعة إسناد جاليلية إلى أخرى تتحرك بحركة منتظمة بالنسبة للأولى تنطبق معادلات تحويل لورنتز . وهذه المعادلات هى الأساس الذى يرتكز عليه اشتقاق الاستنتاجات من نظرية النسبية الخاصة . وهى فى حد ذاتها (أى المعادلات) ليست إلا التعبير عن صحة قانون انتشار الضوء بالنسبة إلى مجموعات الإسناد الجاليلية .

ولقد وجـد منكوفسكى أن تحويلات لورنتـز تحقق الشروط البـسيطة الآتية : دعنا نتخيل حادثتين متجـاورتين يحدد مكانهما النسبى فى المتصل رباعى الأبعاد بالنـسبة إلى مجـموعة الإسنـاد الجاليلية مَ الفـروق المكانية الإحداثية ء س ، ء ص ، ء **ش** والفرق الزمانى ء ز ، وسنفرض أن الفروق المقابلة لهاتين الحادثتين بالنسبة إلى مـجموعة إسناد جاليلية أخرى هى ء س ، ء صَ ، ء شَ ، ء زَ فإنه فى هذه الحالة تحـقق هذه المقادير دائماً الشرط التالى[١] :

$$\text{ء س}^{٣} + \text{ء ص}^{٢} + \text{ء ش}^{٢} - \text{ء ز}^{٣}\,\text{حـ}^{٢} = \text{ء سَ}^{٢} + \text{ء صَ}^{٢}$$

$$+ \text{ء شَ}^{٢} - \text{ء زَ}^{٢}\,\text{حـ}^{٢}$$

وصحة تحويل لـورنتز مترتبة على هذا الشرط ونسـتطيع أن نعبر عن ذلك كمايلى :- المقدار

$$\text{ء ف}^{٢} = \text{ء س}^{٢} + \text{ء ص}^{٢} + \text{ء س}^{٢} - \text{حـ}^{٢}\,\text{ء ز}^{٢}$$

وهو يتعلق بنقطتين متجاورتين من نقط المتصل الزمانى المكانى رباعى الأبعـاد له نفس القيـمة بالنـسبـة إلى كل مجـموعـات الإسناد المختـارة (الجاليلية) وإذا استبدلنا بالمقادير س ، ص ، ش ، $\sqrt{-١}$ حـ ز

المقادير $\text{س}_{١}$ ، $\text{س}_{٢}$ ، $\text{س}_{٣}$ ، $\text{س}_{٤}$ نحصل أيضاً على :

---

(١) انظر الملحق ١ ، ٢ فالعلاقـات التى اشتقت هناك للاحداثيـات نفسها صحيـحة أيضا لفروق الاحداثيات وكذلك أيضا لتفاضلات الاحداثيات (الفروق المتناهية الصفر) .

$$ء ف^٢ = ء س_١^٢ + ء س_٢^٢ + ء س_٣^٢ + ء س_٤^٢$$

مستقلة عن اختيار مجموعة الإسناد (أى أياً كانت مجموعة الإسناد) ونسمى المقدار ء ف « المسافة » التى تفصل بين الحادثتين أو النقطتين رباعيتى الأبعاد .

وهكذا نجد أننا إذا اخترنا كمتغير للزمن المتغير الخيالى $\sqrt{-1}$ حـ ز بدلا من الكمية الحقيقية ز فإننا نستطيع أن نعتبر المتصل الزمانى - المكانى المتفق مع نظرية النسبية الخاصة متصلا إقليدياً رباعى الأبعاد وهذه هى النتيجة التى تؤدى إليها اعتبارات الفصل السابق .

الفصل السابع والعشرون

المتصل الزمانى والمكانى الخاص بالنظرية النسبية العامة

ليس متصلا إقليدياً

استطعنا فى الجزء الأول من هذا الكتاب أن نستعمل إحداثيات زمكانية كان من الممكن تفسيرها تفسيراً فيزيائيا بسيطاً مباشراً وكان من الممكن اعتبارها كما وُضح فى الفصل السادس والعشرين إحداثيات كارتبزية رباعية الأبعاد . وكان هذا ممكناً استناداً إلى قانون ثبوت سرعة الضوء . ولكننا قد رأينا فى الفصل الحادى والعشرين أن نظرية النسبية العامة لا يمكن أن تحتفظ بهذا القانون بل على العكس ظهر أنه تبعاً لهذه النظرية الأخيرة لابد أن تعتمد سرعة الضوء دائماً على الإحداثيات متى وجد مجال جاذبى . وفى سباق توضيح هذا الأمر فى الفصل الثالث والعشرين وجدنا أن وجود المجال الجاذبى يبطل تحديد الإحداثيات والزمن ذلك التحديد الذى استخدمناه فى النظرية النسبية الخاصة .

ونتيجة لهذه الاعتبارات انتهينا إلى الاقتناع بأن المتصل الزمانى المكانى فى النظرية النسبية العامة لا يمكن اعتباره متصلا إقليديا بل إننا نجد هنا الحالة العامة التى تمثلها المائدة الرخامية فى حالة الاختلاف الموضعى

فى درجة الحرارة (مقاومة التسخين) والتى اعتبرناها مصدر ثانى الأبعاد .
وكما كـان مستحيـلا هناك بناء مجموعـة إحداثيات كارتيزية من قـضبان القياس المتـساوية فإنه يسـتحيل هنا أيضاً أن نتخـذ مجموعـة من الأجسام الجاسئة والساعات (مجموعة إسناد) بحيث تكون قضبان القياس والساعات التى رتبت ترتيباً جـاسئا (متمـاسكاً) بالنسبة إلى بعضهـا البعض قادرة على تحديـد الموقع والزمن مباشـرة . ولقد كـان هذا هو لب المشكلة التى واجهتنا فى الفصل الثالث والعشرين .

ولكن الاعتبـارات التى استعرضناها فى الفصلين الخـامس والعشرين والسادس والعشرين ترشدنا إلى طريقة التغلب على هذه الصعوبة . ذلك بأن نسند المتـصل الزمانى المكانى لرباعى الأبعـاد إلى إحداثيـات جاوس بطريقة حكيمة ونخص كل نقطة من المتـصل (حادثة) بأربعة اعداد $س_{١}$ ، $س_{٢}$ ، $س_{٣}$ ، $س_{٤}$ وهى إحداثيات ليس لها أقل معنى فيزيائى مباشر بل لمجرد ترقيم نقط المتصل بطريقة محـددة ولكنها اختيارية . ولا يستوجب هـذا الترتيب حتى أن نعتبـر $س_{١}$ ، $س_{٢}$ ، $س_{٣}$ إحداثيات « مكـان » و $س_{٤}$ إحداثى زمن .

وقد يظن القارىء أن تصوير العالم على هذا النحو تصوير مشوه فما معنى أن نخص حادثة ما بالإحداثيات الخاصة $س_{١}$ ، $س_{٢}$ ، $س_{٣}$ ، $س_{٤}$ إذا كانت هذه الإحداثيات في حد ذاتـها ليس لها معنى ؟ ولكننا لو تمعنا الموضوع بعناية أكثر لرأينا أنه لا أساس لهذا القلق . فلو تأملنا مثلا نقطة

مادية تتـحرك بأية حركـة لوجدنا أنه لو كان وجـود هذه النقطة لحظيا لا يستـمر مع الزمن لأمكن وصفهـا وتحديدها فى الزمان - مكان بمجـموعة واحدة من القيم س١ ، س٢ ، س٣ ، س٤ . وهكذا يجب أن يتـمثل استمـرار وجودها بعدد لا نهـائى من مثل هذه المجموعـات من القيم التى تكون قيمها الإحداثية أيضا متقاربة جداً بحيث توحى بالاستمرار . وعلى ذلك يصبح لدينا مقابل كل نقطة مـادية خط كونى (أحادى الأبعاد) فى المتصل لرباعى الأبعاد . وهكذا تناظر هذه الخطوط فى المتصل نقطاً كثيرة تتحرك والحالة الوحيدة التى تصبح فيها هذه النقط ذات وجود فيزيائى هى فى الحقيقة حالة تقابلها . وحالة التقابل هذه نعبر عنها رياضياً بأن يكون الخطان اللذان يمثلان حركتى النقطتين موضوع البحث لهما مجموعة خاصة من القيم الإحداثية س١ ، س٢ ، س٣ ، س٤ مشتركة بينهما . وإذا تأمل القارىء هذا الأمـر ملياً فلا شك أنه سـيسلم بأن مثل هذه التـقابلات فى الحقيـقة هى الشاهد الفعـلى الوحيد على الجوهر الزمكانى الذى تتـضمنه البيانات الفيزيائية .

إننا إذ نصف حركة نقطة مادية بالنسبـة إلى مجموعة إسناد لا نذكر شيئاً أكثر من تقابلات هذه النقطـة مع نقط خاصة من مجموعة الإسناد . ونستطيـع أيضاً أن نحدد القـيم الزمانيـة المناظرة بوساطة رصـد تقابلات الجسم مع الساعات مرتبطة مع رصد تقابل عقارب الساعات مع نقط معينة على ميناء تلك السـاعات . وهو نفس ما يحدث فى حالة قـياسات المكان

بوساطة قضبان القياس كما يتضح ذلك جيدا لو تأملناه قليلا ببعض الإمعان .

إن ما يلى صحيح بوجه عام : إن كل وصف فيزيائى يتحلل ذاتياً إلى عدد من النصوص يشير كل منها إلى تطابق زمكانى لحادثتين أ ، ب وإذا عبرنا عن كل نص من هذه النصوص بدلالة إحداثيات جاوس نقول إن الإحداثيات الأربعة $س_{١}$ ، $س_{٢}$ ، $س_{٣}$ ، $س_{٤}$ لكلا الحادثتين واحدة . وهكذا نحل فى الحقيقة بصورة كاملة وصف المتصل الزمكانى بوساطة إحداثيات جاوس محل وصف المتصل بوساطة مجموعات الإسناد ويجنبنا الأول منهما أوجه النقص التى تنطوى عليها الطريقة الثانية فليس مقيداً بضرورة فرض الطابع الإقليدى على المتصل الذى نريد تمثيله .

الفصل الثامن والعشرون
التعبير الدقيق عن مبدأ النسبية العام

إننا الآن في وضع يسمح لنا بأن نستبدل بالتعبير المؤقت عن مبدأ النسبية العام الذى قدمناه فى الفصل الثامن عشر تعبيراً آخر دقيقاً جداً . لقد كان تعبيرنا عن ذلك المبدأ على هذه الصورة : كل مجموعات الإسناد م ، مَ . . . إلخ متكافئة من حيث وصف الظواهر الطبيعية (أو صياغة القوانين الطبيعية العامة) مهما كانت حالتها من الحركة . ولا يمكن الآن الاحتفاظ بهذه الصورة لأن استعمال مجموعات الإسناد الجاسئة على الطريقة التى اتبعت فى النظرية النسبية الخاصة لم يعد مستطاعاً بوجه عام لوصف الزمان - مكان فلابد من استبدالها بمجموعات إحداثيات جاوس . والنص التالى يعبر عن الفكرة الأساسية فى مبدأ النسبية العامة . «كل مجموعات إحداثيات جاوس متكافئة من حيث ملاءمتها لصياغة القوانين الطبيعية العامة » .

ونستطيع أيضاً أن نضع مبدأ النسبية العامة هذا على نحو جديد آخر يجعله أسهل فهماً حتى عما لو اعتبرناه امتداداً طبيعياً لمبدأ النسبية الخاص . فتبعاً لنظرية النسبية الخاصة كانت المعادلات التى تعبر عن القوانين

الطبيعية العامة فيما قبل النسبية هى نفس المعادلات النسبية بشرط أن نحل المتغيرات الزمكانية سَ ، صَ ، شَ ، زَ لمجموعة الإسناد الجديدة مَ محل المتغيرات الزمكانية س ، ص ، ش ، ز لمجموعة الإسناد الجاليلية م وذلك باستخدام تحويل لورنتز . أما تبعاً لمبدأ النسبية العام من الناحية الأخرى فيجب أن تحتفظ المعادلات بنفس الشكل عندما نطبق البديلات التحكمية للمتغيرات الجاوسية س١ ، س٢ ، س٣ ، س٤ . وذلك لأن كل تحويل (وليس تحويل لورنتز فقط) يقابل الإنتقال من مجموعة ما من إحداثيات جاوس إلى أخرى .

وإذا أردنا أن نتمسك بنظرتنا القديمة ثلاثية الأبعاد إلى الأشياء فإننا نستطيع أن نصف التجديد أو التقدم الذى تناول الفكرة الأساسية لنظرية النسبية العامة على النحو التالى : إن نظرية النسبية الخاصة تتعلق بالحيز الجاليلى أى المناطق التى لا يوجد بها مجال جاذبى وفى هذه الحالة يستخدم كمجموعة إسناد مجموعة جاليلية أى جسم جاسىء حالته من الحركة مختارة بحيث ينطبق عليها قانون جاليليو لحركة نقطة مادية منعزلة ، أى حركة منتظمة فى خط مستقيم . وبعض الاعتبارات توحى بأننا يحسن بنا أن نرجع أو نسند نفس الحيزات الجاليلية إلى مجموعات إسناد لا جاليلية أيضاً وعندئذ نجد مجالا جاذبياً من نوع خاص بالنسبة إلى هذه المجموعات (انظر الفصل العشرين والثالث والعشرين) .

ولكن شيئاً مثل الأجسام الجاسئة ذات الخواص الإقليدية لا وجود له

فى المجالات الجاذبية وهكـذا لا محل فى نظرية النسبية العامـة لمجموعات الإسناد الجاسئة الخيالية هذه . وكذلك حـركة الساعات . إنها تتأثر أيضاً بمجال الجاذبيـة بحيث يصبح تحديد الزمن فـيزيائياً ويتم مبـاشرة بوساطة الساعات أقل قبولاً عما كان فى نظرية النسبية الخاصة .

ولهذا السبب نستعمل مجموعـات إسناد غير جاسئة لا تتحرك ككل بأى شكل كـان فحـسب بل تعانى تغـيرات فـى الشكل على هواها أثناء حركتها وتستـعمل لتحديد الزمن ساعات لا قيد على قانون حـركتها فهو كيفما اتفق مهما كان شاذاً ، ويجب علينا أن نتصور كلا من هذا الساعات مثبتة فى نقطة من مجموعة الإســناد غير الجاسئة بشرط واحد فقط هو أن تكون القراءات التى تحددها الساعات المتجاورة فى لحظة واحدة مختلفة عن بعضها البعض بقدر ضئيل جداً ، وهذه المجموعة غير الجاسئة والتى يمكن أن نسميها بحق مجموعـة إسناد رخوية هى فى الأصل ما يكافىء مجموعة إحداثيـات جاوس رباعيـة الأبعاد التى نختـارها بطريقة تحكميـة . إن ما يجعل الرخويات أقرب تصورا من مجموعة إحداثيات جاوس هو (ولو أنه لا يوجد مـبرر حـقيقـى لذلك) الأثر الشكلى العالق بأذهاننا عـن الكيان المنفصل لإحداثيات المكان فى مـواجهة إحداثى الزمن . إن كل نقطة على المجموعة الرخوية تعالج على اعـتبارها نقطة مكان وكل نقطة مادية ساكنة بالنسبة لها تـعتبر ساكنة مادمنا نعتـبر القوقعة الرخوة مـجموعة إسناد . ويقضى مـبدأ النسبية الـعامة بأن جميع هـذه الرخويات يمكن استخـدامها

كمجموعة إسناد لها نفس الحقوق ونفس الأهلية فى صياغة القوانين العامة للطبيعة . أما القوانين نفسها فيجب أن تكون مستقلة تماماً عن اختيار المجموعة الرخوية .

إن القوة الهائلة التى ينطوى عليها مبدأ النسبية العامة تكمن فى التحديد الشامل الذى يفرض على قوانين الطبيعة تبعاً لما رأينا آنفاً .

الفصل التاسع والعشرون
حل مشكلة الجاذبية على أساس المبدأ العام للنسبية

أن القارىء الذى استوعب فى أناة وروية كل ما قدمنا من الاعتبارات لن يجد صعوبة ما فى فهم الوسائل المؤدية إلى حل مشكلة الجاذبية .

دعنا نبدأ أولاً بتأمل حيز جاليلى أى حيز خالى من المجال الجاذبى بالنسبة إلى مجموعة الإسناد الجاليلية م . ونحن نعلم من نظرية النسبية الخاصة على أى نحو تسلك قضبان القياس والساعات بالنسبة إلى هذه المجموعة م وهو يشبه سلوك النقطة المادية المعزولة وهذه تتحرك بحركة منتظمة فى خط مستقيم .

ثم دعنا الآن نسند هذا الحيز إلى مجموعة إحداثيات جاوسية أيا كانت أو إلى مجموعة رخوة على اعتبار أنها مجموعة إسناد ولنسمها مَ . عندئذ يكون هناك بالنسبة إلى مَ مجال جاذبى ح (من نوع خاص) ونستطيع أن نقف على كيفية سلوك قضبان القياس والساعات وكذلك النقط المادية التى تتحرك بلا قيد بالنسبة إلى مجموعة الإسناد وذلك

بوساطة التحويل الرياضى ببساطة . ونحن نفسر هذا السلوك بأنه سلوك الساعات وقضبان القياس والنقط المادية تحت تأثير المجال الجاذبى ح . وعند ذلك دعنا نفترض أن أثر المجال الجاذبى على قضبان القياس والساعات والنقط المادية التى تتحرك بحرية يستمر وفقاً لنفس القوانين حتى فى حالة ما إذا كان المجال الجاذبى السائد لا يمكن اشتقاقه من الحالة الجاليلية الخاصة بمجرد تحويل الإحداثيات .

والخطوة التالية لذلك هى أن نبحث السلوك الزمكانى للمجال ح الذى اشتق من الحالة الجاليلية الخاصة بمجرد تحويل الإحداثيات . ويصاغ هذا السلوك فى قانون يكون دائماً صحيحاً مهما كان اختيار مجموعة الإسناد الرخوة التى يتم الوصف بالنسبة إليها . وليس هذا القانون مع ذلك هو القانون العام للمجال الجاذبى ما دام المجال الجاذبى الذى وصفناه هنا موضع الاعتبار من نوع خاص .

ومتى أمكن أن نهتدى إلى القانون العام للمجال الجاذبى يظل واجباً علينا أن نحصل على تعميم للقانون الذى حصلنا عليه آنفا ، ولن يكون هذا بالأمر العسير لو أننا وضعنا نصب أعيننا المطالب التالية :

(ـ أ) يجب أن يتفق التعميم المطلوب مع الفرض العام للنسبية .

(ب) إذا كان فى الحيز موضوع البحث أية مادة فإن كتلتها القصورية فقط وبالتالى طاقاتها حسب الفصل الخامس عشر هى التى توضع موضع الاعتبار لأنها هى التى يتسبب عنها المجال وهى التى تبعثه .

(جـ) يجب أن يحقق المجال الجاذبى والمادة معاً قانون بقاء الطاقة (والدفع)

وأخيراً فإن المبدأ العام للنسبية يسمح لنا بأن نحدد أثر المجال الجاذبى على مجرى كل تلك العمليات التى تحدث وفقاً لقوانين معلومة فى حالة غياب المجال الجاذبى ، أى تلك التى سبق أن دخلت فى إطار نظرية النسبية الخاصة ، ولبيان هذا الأثر نتبع من حيث المبدأ نفس الطريقة التى سبق أن شرحناها بالنسبة إلى قضبان القياس والساعات والنقط المادية التى تتحرك بحرية .

ونظرية الجاذبية التى اشتقت بهذه الطريقة من الفرض العام للنسبية لا تبن غيرها بالنسبة لجمالها ولا من حيث تغلبها على النقص الذى تنطوى عليه الميكانيكا الكلاسيكية والذى أوضحناه فى الفصل الحادى والعشرين، ولا من حيث تفسيرها للقانون التجريبى لتساوى كتلة القصور وكتلة الجاذبية فحسب بل لأنها فوق كل هذا قد نجحت فى تفسير ظاهرة فلكية عجزت عن تفسيرها الميكانيكا الكلاسيكية .

إننا إذا قصرنا تطبيق النظرية على الحالة التى يكون فيها المجال الجاذبى صغيرة والتى تتحرك فيها الكتل بالنسبة إلى مجموعة الإحداثيات بسرعات ضعيفاً مقارنة لسرعة الضوء فإننا نحصل كتقريب أول على نظرية نيوتن . وهكذا نحصل هنا على هذه النظرية دون حاجة إلى أية فروض خاصة فى حين أن نيوتن اضطر إلى إدخال الفرض الذى ينص على أن التجاذب بين نقطتين متجاورتين يتناسب عكسياً مع مربع المسافة

بينهما . وإذا راعينا منتهى الدقة فى التقديرات الحسابية ظهرت الانحرافات والفروق مع نظرية نيوتن ولو أن هذه الفروق جميعها مما لا يمكن اختباره عملياً نظراً لضآلتها المتناهية .

ومع ذلك يجب أن نتوقف قليلاً لنتأمل بإمعان أحد هذه الفروق ، فتبعاً لنظرية نيوتن يتحرك أى كوكب حول الشمس فى قطع ناقص يحتفظ دائماً بموضعه بالنسبة للنجوم الثابتة لو أننا أهملنا حركة النجوم الثابتة نفسها وتأثير الكواكب الأخرى محل الاعتبار . وهكذا إذا صححنا حركة الكواكب الظاهرة وفقا لهذين المؤثرين وإذا كانت نظرية نيوتن صحيحة تماماً وجب أن نحصل على قطع ناقص كمدار للكواكب يكون ثابتاً بالنسبة إلى النجوم الثابتة . وهذا الاستنتاج الذى يمكن التحقق منه بدقة عظيمة كانت غاية ما يمكن بلوغه من الدقة فى حينها ، أمكن التحقق منه بالنسبة إلى كل الكواكب إلا واحداً هو عطارد أقرب الكواكب إلى الشمس فقد أصبح معروفا منذ أيام لوفرييه أن القطع الناقص الذى يمثل مدار عطارد بعد تصحيحه وفقاً للمؤثرين آنفى الذكر ليس ثابتاً بالنسبة إلى النجوم الثابتة بل إنه يدور دوراناً بطيئاً جداً فى مستوى المدار على مثال الحركة المدارية . وكانت القيمة التى حصلنا عليها لهذه الحركة الدورانية للقطع الناقص المدارى تبلغ ٤٣ ثانية من القوس فى القرن وقد تأكد صدق هذا التقدير إلى حدود ثوان قليلة من القوس ، ويمكن إيجاد تفسير مقبول لهذا الأثر تبعاً للميكانيكا الكلاسيكية بشرط التسليم بفروض ضعيفة الاحتمال وضعت خصيصاً لهذا الغرض .

ولكنه وجد على أساس نظرية النسبيــة العامة أن كل القطوع الناقصة التى تدور فيها الكواكب حــول الشمس يجب أن تدور بنفس الطريقة آنفة الذكــر وأن مقدار هــذا الدوران بالنسبــة إلى كل الكواكب ما عــدا عطارد أصغر من أن يمكن اكتشــافه بالوسائل الراهنة ولكنه فى حالة عطارد لابد أن يبلغ ٤٣ ثانيــة من القوس فى القــرن وهى نتيــجة تتفق أتم اتــفاق مع التجربة .

وبخــلاف هذا أمكن الوصــول إلى اســتنتــاجين آخــرين فـقط يمكن وضعهمــا موضع الاختبار ليـشهدا لها وهما انحناء أشعــة الضوء بوساطة مجال جاذبية الشمس[١] وانتقــال موضع خطوط الطيف فــى الضوء الذى يصل إلينا من النجوم الكبيــرة بالمقارنة بموضع نفس هذه الخطوط للأضواء التى يمكن إنتاجها بطريقة مشابهة على الأرض (أى بوساطة نفس الذرة)[٢] وقد تأيد هذان الاستنتاجان اللذان استنتجا نظرياً من النظرية النسبية العامة بالبرهان العملى .

(١) كان ادنجتون وآخرون أول من رصدوا ذلك فى سنة ١٩١٩ (انظر الملحق ٣) .

(٢) حقق ذلك آدمز سنة ١٩٢٤ (انظر الملحق ٣) .

الجزء الثالث

تأملات فى الكون ككل

الفصل الثلاثون
الصعوبات الكونية فى نظرية نيوتن

تنطوى ميكانيكا الأجرام السماوية على مشكلة أساسية أخرى بخلاف المشكلة التى سبق مناقشتها فى الفصل الحادى والعشرين . وقد كان الفلكى سيلجر - فيما أعلم - هو أول من تعرض لدراستها بتوسع وتفصيل . وهذه المشكلة هى موضوع الكون ككل وكيف يجب النظر إليه . إن أول ما يتبادر إلى الذهن هو أن الكون من حيث المكان (والزمان) لا نهائى فهناك نجوم فى كل أجزاء الفضاء بحيث تصبح كثافة المادة ولو أنها شديدة التباين فى تفصيلاتها واحدة فى المتوسط فى كل الفضاء أو بعبارة أخرى فإننا إينما نذهب أو مهما ابتعدنا فى تجوالنا فى الفضاء سنجد فى كل مكان حشوداً مخففة من النجوم الثابتة واحدة النوع والكثافة تقريباً .

ولا تتفق هذه النظرية مع نظرية نيوتن إذ يستوجب هذا أن يكون للكون ما يشبه المركز تبلغ كثافة النجوم فيه أقصاها ثم تأخذ فى التناقص كلما ابتعدنا عن المركز إلى أن - وذلك بعد أبعاد شاسعة - تتلاشى

ليتلوها فراغ لا نهائي[1] . إن الكون النجمي لابد أن يكون جزيرة منتهية في محيط لا نهائي من الفضاء .

وهذا التصور للكون ليس مرضياً تماماً في حد ذاته وهو أقل قبولا لأنه يضطرنا إلى التسليم بأن الضوء الذي ينبعث من النجوم وكذلك أفراد من المجموعة النجمية تخرج باستمرار إلى الفضاء اللانهائي دون رجعة وبحيث لا تعود إلى تبادل التأثير على موجودات الطبيعة الأخرى . إن مثل هذا الكون المادي المنتهي محتوم عليه أن يتلاشى تدريجياً وبانتظام .

ولتفادي هذا العيب اقترح سيلجر تعديلا لقانون نيوتن يفرض فيه أنه في حالة المسافات الشاسعة تتناقص قوة الجذب بين كتلتين بأسرع مما تتناقص به هذه القوة تبعاً لقانون عكس المربع . وبهذه الطريقة يصبح ممكنا أن يظل متوسط كثافة المادة ثابتاً في كل مكان حتى في اللانهاية . وهكذا نتخلص من تلك الفكرة السقيمة التي تحتم أن يكون للكون شيء

---

(١) البرهان على ذلك : تتناسب تبعا لنظرية نيوتن خطوط القوى التي تأتي من مالا نهاية وتنتهي في الكتلة ك مع الكتلة ك وإذا كان متوسط كثافة المادة ث في الكون ثابتا فان كرة حجمها ح ستحتوى على متوسط كتلة ح ث وهكذا يصبح عدد خطوط القوى التي تمر خلال السطح س - وهو سطح الكرة - إلى داخلها متناسب مع ث ح وهكذا يتناسب عدد خطوط القوى التي تمر من وحدة مساحات سطح الكرة إلى داخلها مع (ث $\frac{ح}{س}$) أو (ث نق) وعلى ذلك تصبح أخيرا شدة المجال على سطح الكرة مع ازدياد نصف قطر الكرة لا نهائية وهذا أمر مستحيل .

فى طبيعة المركز . ومن الطبيعى أننا هنا نتفادى ذلك العيب السالف الذكر ولكن بثمن باهظ هو تعديل قانون نيوتن وتعقيده دون أن يكون لهذا التعديل أى أساس نظرى أو تجريبى يستند إليه . إننا نستطيع أن نتخيل عدداً لا حصر له من القوانين التى تؤدى نفس الغرض ولسنا ندرى أيها يجب أن نفضله لأن أياً من هذه القوانين سيستند إلى نفس العدد الضئيل من المبادىء النظرية العامة مثلما يستند قانون نيوتن .

الفصل الحادى والثلاثون

إمكان وجود كون منته ولكنه غير محدود

ولكن الآراء فى بناء الكون تسير أيضا فى اتجاه آخر جد مختلف . فقد دفع بنا تقدم الهندسة اللاإقليدية إلى التسليم بأننا نستطيع أن نلقى الشك على لا نهائية الفضاء حولنا دون أن نرتكب ما يخالف قوانين الفكر أو التجربة (ريمان . هلموهولتن) ولقد عالج تفاصيل هذه المسائل بوضوح لا مزيد عليه كل من هلموهولتن وبوانكاريه ، بينما لا أملك هنا إلا أن أشير إليها فى إيجاز شديد .

دعنا نتخيل أولا عالماً ثنائى الأبعاد . كائنات مفرطحة وكل ما يتعلق بها مفرطح خصوصاً أدوات قياس مفرطحة جاسئة وهذه كلها حرة التحرك فى «مستوى» وبالنسبة إلى هذه الكائنات لا وجود لشيء خارج المستوى إن كل ما يمكن أن يحدث لها أو لمتعلقاتها المفرطحة سيكون محصوراً حتماً فى المستوى الذى هو بمثابة الحقيقة الشاملة بالنسبة لها وعلى الأخص سيكون مستطاعاً هنا تنفيذ إنشاءات الهندسة الإقليدية - أى مثل تلك الإنشاءات الشبكية التى ناقشناها فى الفصل الرابع والعشرين بوساطة أشرطة القياس ، وسيكون عالم هذه الكائنات على عكس عالمنا ثنائى

الأبعاد ولكنه مثل عالمنا يمتد إلى ما لا نهاية . إن فى عالمها متسع لعدد لا نهاية له من المربعات المكونة من قضبان القياس أى أن حجمه (سطحه) لا نهائى . وإذا قالت هذه الكائنات إن عالمها مستو فإنها تصدق لأنها تعنى بذلك أنها تستطيع تنفيذ إنشاءات الهندسة الإقليدية بأعواد قياسها التى تمثل على الدوام نفس المسافة مهما اختلفت مواضعها .

دعنا الآن نتأمل عالما آخر ثنائى الأبعاد ولكنه هذه المرة على سطح كروى بدلا من أن يكون على سطح مستو . إن الكائنات المفرطحة وقضبان قياسها ومتعلقاتها الأخرى تتلاءم جيدا مع هذا السطح . ولا تستطيع هذه الكائنات أن تعتبر هندسة عالمها هندسة مستوية وقضبان القياس التى معها تحقيقاً للمسافة . . . ؟

إنها لا تستطيع ذلك لأنها إذا حاولت أن تقيم خطاً مستقيماً فإنها ستحصل على منحنى منطو على نفسه ذى طول معين منته يمكن قياسه بوساطة قضبان القياس . وبالمثل نجد أن لهذا مساحة منتهية يمكن مقارنتها بمساحة مربع مكون من قضبان القياس ، وروعة هذا المثل الذى نسوقه تكمن فى أنه يوضح لنا أن « كون هذه الكائنات منته غير محدود » .

ولكن الكائنات التى تعيش على سطح الكرة ليست بحاجة إلى أن تدور حول العالم فى رحلة لكى تتبين أنها لا تعيش فى كون إقليدى . إنها تستطيع أن تجد الدليل على ذلك فى كل جزء من أجزاء «عالمها» ما دامت لا تتقيد بجزء ضئيل منه . فإذا أخذت فى رسم خطوط مستقيمة

(وهى أقواس من دوائر بالنسبة لنا أصحاب الفضاء ثلاثى الأبعاد) متساوية الطول ابتداء من نقطة واحـدة وفى جميع الاتجـاهات فإنها ستـسمى الخط الذى يربط نهـايات هذه المستـقيمـات دائرة وعلى السطح المستـوى تكون النسبة بين مـحيط الدائرة ونصف قطرها إذا قيس الطولان بقـضيب واحد من قضبـان القياس ثابتة تبعـاً لهندسة إقليدس المستـوية ومقدارها ط وهذا المقدار مستقل عن طول قطر الدائرة ولكن مخلوقـاتنا المفرطحة ستجد لهذه النسبة المقدار :

$$\text{ط} \; \frac{\text{جا}\left(\frac{\text{نق}}{\text{نق}}\right)}{\frac{\text{نق}}{\text{نق}}}$$

أى أصغـر قليلا من ط . ويزداد الفرق كلمـا زاد نصف قطر الدائرة بالنسبـة إلى نصف القطر **ث** « لكرة العـالم» . وبوساطة هذه العـلاقة تستطيع المخلوقات الكروية أن تحدد نصف قطر كـونها « عالمها » ولو كان جزء صـغير نسبـياً من كرة عالمهـا هو الذى يمكن أن تتناوله قياسـاتها . ولكن إذا كان هذا الجزء صغيراً جـداً حقاً فسوف لا تستطيع هذه الكائنات أن تثبت أنـها على « عالم » كـروى لا على مسـتوى إقليـدى لأن الجزء الصـغيـر جداً من سطح الكرة لا يخـتلف إلا قليـلا عن سطح المستـوى المساوى له فى الإتساع .

وهكذا إذا كانت المخلوقات التى تعيش على سطح كروى تعيش على كوكب لا تشغل مجموعته الشمسية إلا قدراً ضئيلاً من الفضاء الكروى لن يكون فى مقدورها أن تعرف إن كانت تعيش فى كون منته أم لا نهائى لأن « الجزء من الكون » الذى تتناوله أرصاد وأبحاث هذه الكائنات مستوى عملياً فى كلتا الحالتين أى إقليدى . ويتبع ذلك مباشرة أنه بالنسبة للكائنات التى على سطح كروى يتزايد محيط الدائرة أولا تبعا لنصف القطر حتى يصل إلى محيط الكون ولكن إذا استمر نصف القطر فى الازدياد يأخذ عند ذلك المحيط فى التناقص حتى يصل إلى الصفر .

وأثناء هذه العملية تستمر مساحة الدائرة فى الازدياد أكثر فأكثر إلى أن تصبح مساوية للمساحة الكلية لكل « كرة العالم » .

ربما تعجب القارىء لماذا وضعنا « كائناتنا » على كرة لا على أى شكل آخر مغلق . إن لهذا الاختيار سبباً يبرره يتلخص فى أن الكرة من بين كل الأشياء المغلقة الأخرى تنفرد بأن جميع النقط التى عليها متكافئة . إننى أسلم بأن النسبة بين محيط الدائرة ح ونصف قطرها ث تتوقف على نصف قطرها ث ولكن فيما يتعلق بالقيمة الواحدة لنصف القطر تكون هذه النسبة واحدة بالنسبة إلى جميع النقط التى على سطح « العالم » أو بعبارة أخرى إن كرة العالم سطح ثابت الانحناء .

ويوجد « لكرة العالم » ثنائية الأبعاد هذه مثل ثلاثى الأبعاد هو الفضاء الكروى ثلاثى الأبعاد الذى أكتشفه ريمان ، كل نقطة متكافئة

أيضاً وله حجم منتـه يحدده « نصف قطره » (٢ ط^{٢} نق^{٣}) . ولكن هل من الممكن تصور فضاء كـروى . . . ؟ إن تصور أى فضاء لا يعنى سوى أن نتـصـور ملخص تجربتنا فـيه ، أى التـجربة التى نحـصل عليهـا فـى حـركة الأجسـام «الجـاسـئة» وعلى هـذا النحو نستطيع أن نتصـور الفضاء الكروى .

تصـور أننا نرسـم خطوطا أو نمد أوتاراً من نقطـة مـا إلى جـمـيع الأتجاهات ثـم نضع علامـة على كل من هذه الخطوط أو هذه الأوتار على بعد ث من النقطة بوساطة قضيب قياس .

إن كل نهـايات هذه الخطوط أو الأوتار عند هذه العلامـات تقع على سطح كروى ونستطيع على الأخص أن نقـيس المسافة ف على هذا السطح الكروى بوساطة مربع مكون من قضبان القياس فإذا كان الكون أقليديا فإن مساحة السطح تساوى ف = ٤ ط نق^{٢} وإذا كان كروياً تكون أقل دائما من ٤ ط نق^{٢} وكلما زادت قـيمة نق زادت ف على الصفـر إلى أن تصل حد أقصى يـحدده « نصف قطر العـالم » ولكن إذا زادت قيـمة ث أكثر من ذلك أخذت المساحة فى التناقص تدريجيـاً إلى أن تصل أخيراً إلى الصفر . إن الخطوط الخارجية من نقطة الابتداء تبتعد عن بعضها البعض فى أول الأمر أكثر فأكثر ثم تتقارب بعد ذلك وأخيراً تجرى معا مرة ثانية فى نقطة مقـابلة لنقطة الابتـداء . وفى هذه الظروف تكون قد عـبرت كل الفـضاء الكروى . وهكذا يبدو بسهـولة أن الفضاء الكروى الثلاثى الأبعـاد يشبه

الفضـاء الكروى ثنائى الأبعاد ، إنه منته (أى منتـهى الحجم) وليس له حدود تحده .

ويحسن أن نذكر أنـه يوجد نوع آخر من الفضاء المنحـنى هو الفضاء الناقصى ، الذى يمـكن اعتبـاره فضاء منحنيـاً ، النقطتان المتـقابلتان فـيه متطابقتان ، أى لا يمكن التـمييز بينهما بل تامـتا التماثل ، وهكذا يمكن اعتبار الكون الناقصى إلى حد ما كوناً منحنياً له تماثل مركزى .

مما تقدم يتضح أنه من الممكن إدراك الفضاءات المقفولة التى ليس لها حد يحدها ومن بينها يعد الفضاء الكروى والفضاء الناقصى أكثرها بساطة لأن جميع نـقط أى هذين الفضائين متكافـئة . وكنتيجـة لما تقدم ينهض أمام الفلكيين وعلمـاء الفيزياء سؤال على جانب عظـيم من الأهمية : هل الكون الـذى نعـيش فيه لا نهـائى أو أنه منته على نحـو الكون الكروى . . . ؟ إن تجـاربنا أقل جداً مـن أن تسمح لنا بالإجـابة عن هذا السـؤال ولكن نظرية النسبية العامة تسمح لنا أن نجيب عنه بقدر معقول من التأكيد وهكذا تجد المشكلة التى قابلتنا فى الفصل الثلاثين حلا لها .

الفصل الثانى والثلاثون
بناء الفضاء تبعاً للنظرية النسبية العامة

ليست الخواص الهندسية للفضاء تبعاً لنظرية النسبية العامة مستقلة عن المادة بل إن المادة تحدد هذه الخواص . وعلى ذلك لاسبيل لنا إلى دراسة البناء الهندسى للكون ما لم يتوافر لنا مقدماً معرفة حالة المادة فيه كأساس لدراستنا . ونحن نعرف بالتجربة أن سرعات النجوم بالنسبة إلى مجموعة إسناد مناسبة ، صغيرة جداً إذا ما قورنت بسرعة انتشار الضوء . وعلى ذلك نستطيع على وجه التقريب أن نصل إلى رأى عن طبيعة الكون ككل لو عالجنا المادة باعتبارها ساكنة .

ونحن نعلم كما رأينا فى الفصول السابقة أن سلوك قضبان القياس والساعات يتأثر بالمجالات الجاذبية أى بتوزيع المادة وهذا فى حد ذاته يكفى لاستبعاد احتمال أن تكون هندسة الكون إقليدية . ولكنه أمر ميسور الفهم أن الكون الذى نعيش فيه لا يختلف إلا قليلا عن الكون الإقليدى وهذه الفكرة تبدو أكثر احتمالا ما دامت التقديرات الحسابية تظهر أن قياسات الفضاء المحيط بالمادة لا تتأثر إلا تأثيراً ضعيفاً حتى من أجسام بمثل كتلة الشمس . ويمكن أن نتخيل أن الكون من الناحية الهندسية يسلك سلوك

سطح منحن بغير انتظام فى أجزائه الفردية دون أن يبتعد كثيراً فى أى مكان فيه عن المستوى . إنه يبدو كسطح بحيرة متموج ، وكون كهذا يمكن أن يقال عنه إنه شبه إقليدى وإنه من حيث فضاؤه لا نهائى . ولكن التقديرات الحسابية تظهر أن كثافة المادة فى كون شبه إقليدى لابد أن تكون صفراً . وهكذا لا يمكن أن يكون مثل هذا الكون مأهولا بالمادة فى كل أجزائه ، إنه سيعيد أمامنا الصورة غير المرضية التى رسمناها فى الفصل الثلاثين .

فإذا كان لابد أن يكون للمادة فى الكون متوسط كثافة يختلف عن الصفر مهما كان هذا الاختلاف ضئيلا فلابد إذا أن يكون الكون غير إقليدى ولا حتى شبه إقليدى ، وعلى العكس تثبت نتائج التقديرات الحسابية أنه إذا انتظم توزيع المادة فإن الكون يكون بالضرورة كروياً (أو ناقصاً) ولما كان توزيع المادة تفصيلا فى الحقيقة ليس منتظماً فإن الكون الحقيقى سينحرف فى أجزائه الفردية عن الكروى أى أن الكون سيكون شبه كروى ولكنه سيكون بالضرورة منتهياً . ولكن النظرية تمدنا فى الواقع بعلاقة[1] بسيطة بين التمدد الفضائى للكون ومتوسط كثافة المادة فيه .

---

(١) لنصف القطر نق للكون على المعادلة $نق^{٢} = \frac{٢}{هـ\,ث}$ وإذا استخدما النظام سم. جرام. ثانية للقياس فى هذه المعادلة حصلنا على $\frac{٣}{هـ} = ١,٠٨ \times ١٠^{٢٧}$ حيث ث هو متوسط كثافة المادة ، هـ ثابت متعلق بثابت نيوتن للتجاذبية .

الملاحق

١ – اشتقاق بسيط لتحويل لورنتز .

٢– فضاء منكوفكس رباعى الأبعاد « عالم » .

٣– التأييد التجريبى لنظرية النسبية العامة .

٤– بناء الفضاء تبعاً لنظرية النسبية العامة .

٥– النسبية ومشكلة الفضاء .

الملحق الأول

اشتقاق بسيط لتحويل لورنتز

(تكملة للفصل الحادى عشر)

يجب أن نراعى أن يتطابق باستمرار المحوران السينيان لكل من مجموعتى الإحداثيات الموضحتين فى شكل - ٢ - . وبذلك يتم بعض التوجيه النسبى لهما . وفى الحالة الحاضرة نستطيع أن نجزىء المسألة إلى أجزاء بأن نضع محل الاعتبار أولا الحوادث التى تقع على المحاور (س) فقط . فأى هذه الحوادث يمثلها بالنسبة إلى مجموعة الإحداثيات (م) الإحداثى س و الزمن ز . وبالنسبة إلى مجموعة الإحداثيات (مَ) الإحداثى سَ والزمن زَ وعلينا أن نجد سَ ، زَ إذا كنا نعلم س ، ز .

إن أية إشارة ضوئية تنتقل على طول المحور الإيجابى س تنتشر وفقاً للمعادلة س = حـ ز .

أى س - حـ ز = صفر (١)

ولما كانت نفس الإشارة الضوئية يجب أن تنتشر بالنسبة إلى مَ بالسرعة حـ فعلى ذلك سيكون انتشار الضوء بالنسبة إلى المجموعة مَ وفق المعادلة المماثلة

س - حـ ز = صفر. (١)

إن تلك النقط الزمكانيــة (الحوادث) التى تحقــق المعادلة (١) لابد أن تحقق المعــادلة (٢) أيضاً . وواضح أن هذا يتحقق عندمــا تتحقق عــموماً العلاقة . (سَ - حـ زَ) = ت (س - حـ ز) (٣)

حيــث تشير ت إلـى ثابت . لأنــه تبعاً للمعادلة (٣) نجد أن اختفاء (سَ - حـ زَ) يتضمن اختفاء (سَ - حـ زَ) .

وإذا أجرينا المثل على أشعة الضوء التى تنتشر على المحور السلبى س نحصل على الحالة .

(سَ - حـ زَ) = ث (س - حـ ز) (٤)

وإذا جمــعنا (أو طرحنا) المعــادلات (٣) ، (٤) وأحللنا للسهــولة الثوابت أ ، ب محل الثوابت ت ، ث بحيث تكون :

$$أ = \frac{ت + ث}{٢}$$

$$ب = \frac{ت - ث}{٢}$$

نحصل على المعادلات

$$\begin{cases} سَ = أ\,س + ب\,حـ\,ز \\ حـ\,زَ = أ\,حـ\,ز - ب\,س \end{cases} \quad (٥)$$

وهكذا يجب أن نحصل على حل المشكلة لو كنا نعلم الثوابت أ ، ب : وهذه الثوابت يمكن معرفتها تبعا لمايلى :

بالنسبة إلى أصل مَ يكون لدينا على الدوام سَ = صفر

وعلى ذلك يكون تبعاً للمعادلة الأولى من المعادلات (٥)

$$سَ = \frac{ب\ حـ}{أ}\ ز$$

وإذا رمزنا بالرمز ع إلى السرعة التى يتحرك بها أصل مَ بالنسبة إلى م يكون :

$$ع = \frac{ب\ حـ}{أ} \qquad (٦)$$

ونفس القيمة ع يمكن الحصول عليها من المعادلات (٥) إذا حسبنا سرعة نقطة أخرى من مَ بالنسبة إلى م أو السرعة (الموجهة نحو المحور السينى السلبى) لنقطة على م بالنسبة إلى مَ . وباختصار نستطيع أن نسمى ع السرعة النسبية للمجموعتين .

وفوق ذلك فإن مبدأ النسبية يعلمنا أن طول وحدة القياس الساكنة بالنسبة إلى مَ كما يبدو لراصد على م يجب أن يكون هو نفس طول وحدة القياس الساكنة بالنسبة إلى م كما يبدو لراصد على مَ . ولكى نرى كيف تظهر نقط المحور سَ لراصد على م فإننا نحتاج فقط إلى التقاط صورة خاطفة (لقطة سريعة) للمجموعة مَ من المجموعة م . ومعنى هذا

أنه يجب علينا أن ندخل قيمة خاصة ز (ز من م) أى ز = صفر ولهذه القيمة من ز نحصل من المعادلة الأولى (٥) على :

$$س' = أ س$$

وعلى ذلك تكون النقطتان اللتان تفصلهما على المحور س المسافة Δ س = ١ مقيسة فى المجموعة مَ مفصولتين فى اللقطة الخاطفة أو الصورة اللحظية بالمسافة :

$$\Delta س = \frac{١}{أ} \quad (٧)$$

ولكن إذا أخذت اللقطة السريعة من مَ (زَ = صفر) وإذا استبعدنا زمن المعادلات (٥) وأدخلنا فى اعتبارنا التعبير (٦) حصلنا على :

$$سَ = أ \left(١ - \frac{ع^٢}{حـ^٢} \right) س$$

ومن هذا نستخلص أن نقطتين على المحور س تفصلهما المسافة أ (بالنسبة إلى م) سيمثلهما فى الصورة الخاطفة التى أخذناها المسافة :

$$\Delta سَ = أ \left(١ - \frac{ع^٢}{حـ^٢} \right) \quad (٧ أ)$$

ولكن لابد تبعاً لما تقدم ذكره أن تكون الصورتان متماثلتين وعلى ذلك لابد أن تكون λ س فى (٧) متساوية مع λ سَ فى (٧أ) بحيث نحصل على :

$$أ^{٢} = \frac{١}{١ - \frac{ع^{٢}}{حـ^{٢}}} \qquad (٧ ب)$$

والمعادلتان (٦) ، (٧ ب) تحددان الثابتين أ ب . وإذا أدخلنا قيمة هذين الثابتين فى (٥) نحصل على المعادلة الأولى والرابعة اللتين سبق ذكرهما فى الفصل الحادى عشر .

$$\left.\begin{aligned} س &= \frac{س - ع ز}{\sqrt{١ - \frac{ع^{٢}}{حـ^{٢}}}} \\ ز &= \frac{ز - \frac{ع}{حـ^{٢}} س}{\sqrt{١ - \frac{ع^{٢}}{حـ^{٢}}}} \end{aligned}\right] \qquad (٨)$$

وهكذا حصلنا على تحويل لورنتز بالنسبة إلى الحوادث على المحور س وهو يحقق الشرط :

$$سَ^{٢} - حـ^{٢} زَ^{٢} = س^{٢} - حـ^{٢} ز^{٢} \qquad (٨ أ)$$

وامتداد هذه النتيجة ليشمل الحوادث التى تقع خارج المحور س يمكن الحصول عليه بالاحتفاظ بالمعادلات (٨) وتزويدها بالعلاقات :

$$\left.\begin{array}{l} ص َ = ص \\ ش َ = ش \end{array}\right\} \qquad (٩)$$

وبهذه الطريقة تحقق الفرض الذى ينص على أن سرعة الضوء ثابتة فى الفراغ (مهما كان اتجاه اشعته) بالنسبة إلى كلا المجموعتين م ، مَ . ويمكن توضيح ذلك كمايلى :

دعنا نتخيل أن إشارة ضوئية أرسلت من أصل م فى الوقت ز = صفر إنها سوف تنتشر تبعاً للمعادلة :

$$ح = \sqrt{س^{٢} + ص^{٢} + ش^{٢}} = حـ ز$$

وإذا ربعنا هذه المعادلة نجد أن الإشارة الضوئية ستنتشر تبعاً للمعادلة

$$س^{٢} + ص^{٢} + ش^{٢} - حـ^{٢} ز^{٢} = صفر \qquad (١٠)$$

ويستوجب قانون انتشار الضوء مرتبطاً مع فرض النسبية أن يحدث انتقال الإشارة الضوئية - وذلك كما يبدو بالنسبة إلى المجموعة مَ - تبعاً للتعبير المناظر :

$$حَ = حـ زَ$$

أو $\text{س}'^{٢} + \text{ص}'^{٢} + \text{ش}'^{٢} - \text{حـ}^{٢}\,\text{ز}'^{٢} = \text{صفر}$ (١٠ أ)

وحتى تكون المعادلة (١٠ أ) نتيجة للمعادلة (١٠ يجب أن يكون)

$$\text{س}'^{٢} + \text{ص}'^{٢} + \text{ش}'^{٢} - \text{حـ}^{٢}\,\text{ز}'^{٢} = \phi$$

$$(\text{س}^{٢} + \text{ص}^{٢} + \text{ش}^{٢} - \text{حـ}^{٢}\,\text{ز}^{٣}) \quad (١١)$$

ولما كانت المعادلة (٨ أ) يجب أن تنطبق على النقط التى على المحور س فإننا هكذا نحصل على ϕ = ١ ومن السهل أن نرى أن تحويل لورتنز يحقق فعلا المعادلة (١١) عندما تكون ϕ = ١ لأن (١١) نتيجة للمعادلات (٨ أ) ، (٩) وعلى ذلك فهى أيضا نتيجة للمعادلات ٨ ، (٩) ، وهكذا نكون قد قمنا باشتقاق تحويل لورنتز .

وتحويل لورنتز الذى تمثله المعادلتان (٨) ، (١٠) لا يزال بحاجة إلى أن يعمم . فمن الواضح أنه ليس محتما أن نختار محاور مَ بحيث تتوازى مكانياً مع محاور م ، وليس محتما أيضاً أن تكون سرعة انتقال مَ بالنسبة إلى م فى اتجاه المحور س . وإذا أمعنا الفكر قليلا نرى أننا نستطيع أن نبنى تحويل لورنتز بهذا المعنى العام من نوعين من التحويلات هما تحويلات لورنتز بالمعنى الخاص ، ومن التحويلات المكانية البحتة الأمر الذى يناظر استبدال مجموعة الإحداثيات قائمة الزوايا بمجموعة جديدة تتجه محاورها فى اتجاهات أخرى . ونستطيع رياضياً أن نصف تحويل لورنتز المعمم كمايلى :

انه يعبر عن س ، ص ، ش ، ز في حدود الدوال الخطيه المتماثله

للمقادير س ، ص ، ش ، ز بشكل يجعل العلاقة :

$$\overline{\text{س}}^{2} + \overline{\text{ص}}^{2} + \overline{\text{ش}}^{2} - \text{حـ}^{2}\,\overline{\text{ز}}^{2} = \text{س}^{2} + \text{ص}^{2} + \text{ش}^{2} - \text{حـ}^{2}\,\text{ز}^{2} \qquad (\text{١١ أ})$$

تتحقق بذاتها . أى أننا إذا أحللنا تعـبيراتها فى حدود س ، ص ، ش ، ز مـحل $\overline{\text{س}}$ ، $\overline{\text{ص}}$ ، $\overline{\text{ش}}$ ، $\overline{\text{ز}}$ فى الشق الأيسر من (١١ أ) يتـفق مع الشق الأيمن عند ذلك .

الملحق الثانى

فضاء منكوفسكى رباعى الأبعاد

(تكملة الفصل السابع عشر)

من الممكن أن نحدد معالم تحويل لورنتز بطريقة أكثر بساطة مما تقدم إذا نحن أدخلنا الكمية الخيالية $\sqrt{-1}$ حـ ز محل ز كمتغير الزمن . وإذا أدخلنا متفقا مع هذا :

$$س_{١} = س$$

$$س_{٢} = ص$$

$$س_{٣} = ش$$

$$س_{٤} = \sqrt{-١}\ حـ\ ز$$

وبالمثل للمجموعة مَ . عند ذلك يمكن التعبير عن الشرط الذى تحقق بالذات هكذا :

$$\bar{س}_{١}^{٢} + \bar{س}_{٢}^{٢} + \bar{س}_{٣}^{٢} + \bar{س}_{٤}^{٢} = س_{١}^{٢} + س_{٢}^{٢} + س_{٣}^{٢} + س_{٤}^{٢} \qquad (١٢)$$

أى أنه عن طريق هذا الاختيار للإحداثيات تتحول المعادلة (١١ أ) إلى هذه المعادلة (١٢) .

ونرى من المعادلة ١٢ أن الإحداثى الزمنى الخيالى $س_{٤}$ يدخل فى شرط التحويل بنفس الطريقة التى تدخل بها الإحداثيات $س_{١}$ ، $س_{٢}$ ، $س_{٣}$ ونتيجة لهذه الحقيقة يدخل « الزمن » $س_{٤}$ تبعاً لنظرية النسبية فى القوانين الطبيعية بنفس شكل إحداثيات المكان $س_{١}$ ، $س_{٢}$ ، $س_{٣}$.

ولقد سمى منكوفسكى المتصل رباعى الأبعاد الذى تصفه «الإحداثيات» $س_{١}$ ، $س_{٢}$ ، $س_{٣}$ ، $س_{٤}$ « عالماً » كما سمى « نقطة حادثة » « بنقطة عالم » ومن « حدوث » فى فضاء ثلاثى الأبعاد تتحول الفيزياء كما لو كانت « وجوداً » فى « العالم » رباعى الأبعاد .

وهذا «العالم» رباعى الأبعاد يحمل فى طياته تماثلا قريباً من الفضاء ثلاثى الأبعاد فى هندسة إقليدس التحليلية . فإذا أدخلنا فى هذا الأخير مجموعة إحداثيات كارتيزية جديدة ($\bar{س}_{١}$ ، $\bar{س}_{٢}$ ، $\bar{س}_{٣}$) بنفس الأصل فإن $\bar{س}_{١}$ ، $\bar{س}_{٢}$ ، $\bar{س}_{٣}$ تكون دوال خطية متماثلة لـ $س_{١}$ ، $س_{٢}$ ، $س_{٣}$ التى تحقق بذاتها المعادلة $\bar{س}_{١}^{٢} + \bar{س}_{٢}^{٢} + \bar{س}_{٣}^{٢} = س_{١}^{٢} + س_{٢}^{٢} + س_{٣}^{٢}$.

والتماثل مع (١٢) تماثل تام . ويمكننا أعتبار « عالم » منكوفسكى بطريقة شكلية فضاءً إقليدياً رباعى الأبعاد (له إحداثى زمانى خيالى) ويكون تحويل لورنتز مناظراً « لدوران » مجموعة الإحداثيات فى «العالم» رباعى الأبعاد .

الملحق الثالث

الإثبات التجريبى لنظرية النسبية العامة

نستطيع أن نتخيل من الناحية النظرية المنظمة عملية تطور علم من العلوم الوصفية علي أنها فى الواقع عملية استقراء مستمرة . إننا نضع النظريات ونصوغها فى عبارة وجيزة . وهى تضمينات لعدد كبير من الملاحظات الفردية فى صورة قوانين وصفية . ومن هذه النظريات نستطيع تأكيد القوانين العامة عن طريق المقارنة . من هنا نرى أن نمو وتقدم علم من العلوم يشبه شبهاً كبيراً عملية وضع أو إنشاء فهرس مبوب . إنه يبدو كما لو كان أمراً وصفياً محضاً .

لكن هذا الرأى رأى ضيق الأفق فهو لا يحيط أبداً بكل نواحى العملية فى الواقع ؛ لأنه بغض النظر عن الدور الهام الذى يلعبه الحدس والفكر الاستنباطى فى نمو علم من العلوم المضبوطة . إذ بمجرد أن يخطو علم ما من هذه العلوم خطواته الأولى لا تعد خطوات تقدمه النظرى التالية تتم عن طريق مجرد التبويب ؛ لأن الباحث متأثرا بالمدلولات التجريبية يميل إلى إتخاذ منهج فكرى يعتمد منطقياً على عدد صغير من الفروض الأساسية التى تسمى بديهيات . ومثل هذا المنهج أو المذهب الفكرى

يسمى نظرية . والمبرر الوحيد لوجود النظرية هو أنها تنتظم عدداً كبيراً من المشاهدات المفردة . وفى هذا الأمر بالذات يكمن « صدق » النظرية .

وقد يقابل المجموعة المتشابكة الواحدة من المعطيات الوصفية عدة نظريات قد تختلف فيما بينها إلى حد بعيد . ولكن هذه النظريات من ناحية الاستنتاجات التى تشتق منها والتى يمكن اختبارها عملياً قد يكون الاتفاق بينها تاماً بحيث يتعذر العثور على استنتاج واحد تختلف حوله هذه النظريات . ومن أمثلة ذلك حالة مشهورة فى عالم الحياة يهتم لها الكثيرون هى نظرية داروين فى أصل الأنواع وتطورها عن طريق بقاء الأصلح فى معترك الوجود . والنظرية الأخرى فى تطور الأنواع على أساس انتقال الخواص المكتسبة وراثياً .

وهناك مثال آخر لذلك - هو الاتفاق البعيد المدى فى الاستنتاجات من نظريتين فى الميكانيكا النيوتونية من ناحية ونظرية النسبية العامة من الناحية الأخرى . وهذا الاتفاق يذهب بعيداً إلى حد أننا إلى الآن لم نعثر إلا على استنتاجات قليلة يمكن وضعها موضع البحث والاختبار ولا تؤدى إليها أيضا فيزياء ما قبل النسبية . وهذا على الرغم من الاختلاف العميق بين الفروض الأساسية للنظريتين . وسنتأمل فيمايلى مرة ثانية هذه الاستنتاجات الهامة وسنناقش الشواهد التجريبية التى حصلنا عليها إلى الآن ، والتى تتعلق بها .

(أ) حركة حضيض مسار عطارد:

يجب أن يدور الكوكب الذى يدور حول الشمس وذلك تبعاً لميكانيكا نيوتن وقانون نيوتن للجاذبية فى قطع ناقص حولها أو بعبارة أصح حول مركز الثقل المشترك للكوكب والشمس . وفى مثل هذه المجموعة تقع الشمس أو مركز الثقل المشترك فى إحدى بؤرتى القطع بحيث يأخذ البعد الشمس - الكوكب فى التزايد من حد أدنى إلى حد أقصى ثم يتناقص ثانية إلى الحد الأدنى وذلك خلال سنة كوكبية[1] ولو أننا أحللنا محل قانون نيوتن قانوناً آخر للجذب مختلفاً بعض الشىء لوجدنا فى التقدير الحسابى أن الحركة ستظل تحدث تبعاً لهذا القانون الجديد بحيث يظل البعد الكوكب - الشمس دورى التغير . ولكن فى هذه الحالة ستكون الزاوية المحصورة بين الخطين الواصلين من الشمس إلى الكوكب فى أول هذه الفترة ثم فى نهايتها (أى من حضيض - أقرب نقطة إلى الشمس - إلى حضيض تال) تختلف عن ٣٦٠ درجة ولن يكون خط المدار خطاً مقفولا بل إنه مع الزمن سيملأ جزئياً حلقياً من مستوى المدار. أعنى بين دائرة أقل بعد للكوكب ودائرة أكبر بعد له عن الشمس .

وتبعاً لنظرية النسبية العامة التى تختلف طبعاً عن نظرية نيوتن نجد أن تغييراً صغيراً عن حركة نيوتن - كبلر لكوكب ما فى مداره يجب أن

(١) هذا هو ما يسمى أحيانا بالأوج والحضيض . (المترجم) .

تحدث بحيث تكون الزاوية المحصورة بين القطر الشمس - الكوكب فى الحضيض والذى يليه تزيد على الزاوية التى تناظر دورة كاملة بمقدار يحدده

$$+ \frac{\text{٢٤ ط}^{٣}\ \text{أ}^{٢}}{\text{ر}^{٢}\ \text{حـ}^{٢}\ (\text{١} - \text{ى}^{٢})}$$

ملاحظة : تقابل دورة كاملة الزاوية ٢ ط فى القياس المطلق للزويا المستعمل فى الفيزياء . والتعبير عاليه يحدد المقدار الذى يزيد به قطر الشمس - الكوكب على هذه الزاوية خلال الفترة بين حضيض والذى يليه . وفى هذا التعبير ترمز أ لنصف المحور الأكبر للقطع الناقص ، ى إلى بروزه ، حـ إلى سرعة الضوء ، ر إلى مدة دورة الكوكب . ويمكن وضع هذه النتيجة على هذا النحو أيضاً : إن المحور الأكبر للقطع الناقص يدور تبعاً لنظرية النسبية العامة حول الشمس على نحو الحركة المدارية للكوكب ، وتستوجب نظرية النسبية أن يكون هذا الدوران بمقدار ٤٣ ثانية من القوس فى القرن بالنسبة للكوكب عطارد ، أما بالنسبة للكواكب الأخرى فى مجموعتنا الشمسية فإن مقداره تبعاً لنظرية النسبية لابد وأن يكون صغيراً جداً بحيث لا يسهل الاستدلال عليه[١] .

ولقد وجد الفلكيون فى الحقيقة أن نظرية نيوتن ليست كافية لحساب

(١) خصوصاً وان الكوكب التالى وهو الزهرة له مدار يكاد يطابق الدائرة مما يجعل تحديد الحضيض أمرا بالغ الصعوبة (الحضيض هو الوقع الذى يكون فيه الكوكب أقرب ما يكون إلى الشمس) .

حركة عطارد التى كشفت عنها الأرصاد بـدقة تناظر الدقة والحساسية التى وصلت إليـها الأرصاد حـالياً . ولقـد وجد كل من لوفريـيه سنة ١٨٥٩ ونيوكـامب سنة ١٨٩٥ أنه بعد وضع كل عـوامل الاضطراب المؤثرة على عطارد بوساطة بقية الكواكب مـحل الاعتبار قد تبقت حركة حـضيضية لا تفسيـر لها مقدارها لا يختلـف كثيراً عن المقدار المذكـور عاليه وهو + ٤٣ ثانية القوس فى القرن . وكـان مقدار التقريب فى هذه النتيـجة لا يتجاوز ثوان قليلة فقط .

(ب) انحناء الضوء تحت تأثير مجال الجاذبية :

لقد ذكرنا فى الفصل الثانى والعشرين أن نظرية النسبية العامة تنص على أن شعاع الضوء ينحرف عن طريقه عند مروره فى مجال جاذبى وهذا الانحراف يشبـه ما يعانيه مسـار جسم قذف فى مجـال مجاذبى . ولذلك يجب أن نتوقع أن ينحرف شعاع الضـوء الذى يمر قريباً من جرم سماوى نحو هذا الجـرم . وزاوية الانحـراف الـذى يعانيه شعاع ضـوئى يمر قريباً من الشمس على مسافة ىٔ نصف قطر الشمس من مركزها يجب أن يكون مقدارها :

$$أ = \frac{\text{١,٧ ثانية من القوس}}{\Delta}$$

ويمكن هنا أن نضيف إلى ما تقـدم أنه تبعاً للنظرية يكون نصف هذا

الانحراف ناشئاً عن المجال النيوتونى لجاذبية الشمس والنصف الآخر ناشئاً عن التغير الهندسى للفضاء (الانحناء) الذى تحدثه الشمس .

وهذه النتيجة مما يمكن التحقق منها عملياً بوساطة التسجيل الفوتوغرافى لمواقع النجوم أثناء الكسوف الكلى للشمس والسبب الوحيد الذى يضطرنا إلى انتظار فترة كسوف الشمس هو أنه فى الأوقات الأخرى تكون السماء مضاءة بشدة الشمس لدرجة تجعل النجوم القريبة الموضع من قرص الشمس متعذرة الرؤية . والأثر الذى تتنبأ به نظرية النسبية العامة يمكن فهمه بوضوح من الشكل التوضيحى المرافق لهذا . فإذا لم تكن الشمس ش موجودة فإن نجماً بعيداً لدرجة لا نهائية عمليا يرى فى الاتجاه ع١ إذا رصد من الأرض ولكنه نتيجة لانحراف الضوء الصادر من النجم بوساطة الشمس فإنه سيرى فى الاتجاه ع٢ أى على بعد من مركز الشمس أكبر قليلا مما يناظر موقعه الحقيقى .

(شكل ٥)

والطريقة العملية لإجراء هذا الاختبار هى تصوير النجوم التى فى جوار الشمس أثناء كسوفها ثم تؤخذ صور أخرى لنفس تلك النجوم عندما تكون الشمس فى موضع آخر من السماء أى بعد أو قبل ذلك بشهور قليلة . فإذا قورنت هذه الصورة بالصورة القياسية فإن مواقع هذه النجوم على الصورة أثناء الكسوف يجب أن تبدو مزحزحة قطرياً إلى الخارج (بعيداً عن مركز الشمس) بمقدار يساوى الزاوية أ .

ونحن مدينون للجمعية الملكية والجمعية الفلكية الملكية باختبار هذا الاستنتاج المهم . فلقد قامت هاتان الجمعيتان ولم تقعدهما الحرب ولا الصعاب المادية أو النفسية التى أثارتها هذه الحرب فأرسلتا بعثتين واحدة إلى سوبر ال (البرازيل) والأخرى إلى جزر برنسيب فى غرب أفريقيا . وأرسلتا عدداً من أشهر الفلكيين البريطانيين (ادنجتون وكننجهام وكروملين ودافيدسن) لكى تحصل على الصور الفوتوغرافية لكسوف الشمس يوم ١٩١٩/٥/٢٩ . ولقد كانت الفروق المنتظر وجودها بين الصور الفوتوغرافية للنجوم أثناء كسوف الشمس وصور المقارنة تبلغ من الصغر حد أجزاء قليلة من المائة من المليمتر فقط ، وهكذا كان لزاماً أن تراعى الدقة البالغة والحساسية الفائقة فى التقاط الصور ثم إجراء القياسات بعد ذلك .

ولقد أيدت نتائج هذه القياسات نظرية النسبية بطريقة تبعث على الرضا والارتياح التامين . والجدول التالى يوضح النتائج وهى تشمل المركبات قائمة الزوايا للانحرافات تبعاً للتقدير الحسابى استناداً إلى النظرية والمقادير التى وجدت عمليا فى التجربة بالقياس .

رقم النجم	الإحداثى الأول		الإحداثى الثانى	
	تبعا للتجربة	حسابيا	تجريبيا	حسابيا
١١	- ٠,١٩	- ٠,٢٢	+ ٠,١٦	+ ٠,٠٢
٥	+ ٠,٢٩	+ ٠,٣١	+ ٠,٤٦	+ ٠,٤٣
٤	+ ٠,١١	+ ٠,١٠	+ ٠,٨٣	+ ٠,٧٤
٣	+ ٠,٢٠	+ ٠,١٢	+ ١,٠٠	+ ٠,٨٧
٦	+ ٠,١٠	+ ٠,٠٤	+ ٠,٥٧	+ ٠,٤٠
١٠	+ ٠,٠٨	+ ٠,٠٩	+ ٠,٣٥	+ ٠,٣٢
٢	+ ٠,٩٥	+ ٠,٨٥	٠,٢٧	- ٠,٠٩

(جـ) انتقال خطوط الطيف نحو الأحمر :

لقد أوضحنا فى الفصل الثالث والعشرين أنه فى مجموعة الإسناد مَ التى فى حالة دوران بالنسبة إلى مجموعة إسناد جاليلية م تسير الساعات متماثلة البناء والتى تعتبر فى حالة سكون بالنسبة إلى مجموعة الإسناد الدوارة بمعدلات تعتمد على مواقع الساعات وسنختبر الآن مدى هذا الاعتماد ومقداره كمياً . إن الساعة التى توضع على المسافة ف من مركز القرص يكون لها سرعة بالنسبة إلى م يحددها :

عـ = ع ف

حيث تكون ع السرعة الزاوية لدوران القرص مَ بالنسبة إلى م فإذا كانت غ. تمثل عدد دقات الساعة من الزمن (« معدل » الساعة) بالنسبة إلى م عندما تكون الساعة فى حالة السكون فإن « معدل » الساعة غ. عندما تكون متحركة بالنسبة إلى م بالسرعة ع ولكنها ساكنة بالنسبة إلى القرص سيكون تبعاً للفصل الثانى عشر تبعاً للمعادلة :

$$\text{غ} = \text{غ.} \sqrt{1 - \frac{\text{ع}^2}{\text{ح}^2}}$$

أو تحدده بدقة كافية المعادلة

$$\text{غ} = \text{غ.} \left(1 - \frac{1}{\text{ح}^2} \, \frac{\text{ع}^2 \text{ف}^2}{2} \right)$$

وإذا رمزنا إلى فرق الجهد لقوة الطرد المركزية بين موضع الساعة ومركز القرص بالرمز ش أى الشغل باعتبار سلبى الذى يجب أن يتم على وحدة الكتلة ضد قوة الطرد المركزى لكى ينقلها من موضع الساعة على القرص الدائر إلى مركز القرص . عند ذلك نحصل على :

$$\text{ش} = \frac{\text{ع}^2 \text{ف}}{2}$$ ومنه نرى :

أن $غ = غ_{.} \left(١ + \frac{ش}{حـ^{٢}} \right)$

ومن هذا التعبير نرى أولا أن ساعتين متماثلتى التركيب تسيران بمعدلين مختلفين عندما توضعان على مسافات مختلفة من مركز القرص وهذه النتيجة صحيحة بالنسبة لراصد يدور مع القرص .

والآن نجد أن القرص واقع بالنسبة لراصد عليه فى مجال جاذبى جهده ش ولذلك تنطبق النتيجة التى حصلنا عليها عاليه على المجالات الجاذبية جيداً . وفوق ذلك فإننا نستطيع أن نعتبر الذرة التى تصدر عنها خطوط الطيف مَثَلُها مثَلُ الساعة ولهذا نجد أن العبارة التالية صحيحة :

« تصدر الذرة أو تمتص ضوءاً يوقف تردده على جهد المجال الجاذبى الذى تقع فيه الذرة » .

وتردد ذرة على سطح جرم سماوى سيكون أقل قليلا من تردد ذرة من نفس العنصر موجودة فى الفضاء الحر أو على سطح جرم سماوى أصغر) والآن نجد أن $ش = - ل \frac{ك}{ف}$ حيث ل ثابت نيوتن للجاذبية ، ك كتلة الجرم السماوى . وهكذا نجد أن خطوط الطيف يجب أن تنتقل نحو الأحمر على سطوح النجوم مقارنة بخطوط الطيف لنفس العنصر على الأرض ومقدار هذا الانتقال هو :

$$\frac{\text{غ}_{.} - \text{غ}}{\text{غ}_{.}} = \frac{\text{ك ل}}{\text{حـ}^{٢}\ \text{ف}}$$

ولقد وجد أن مقدار الانتقال نحو الأحمر بالنسبة للشمس كما تتنبأ به النظرية يبلغ حوالى جزءين من مليون من طول الموجة . وليس من الممكن الحصول على تقدير يوثق به لهذا المقدار بالنسبة للنجوم لأننا على العموم نجهل كل من الكتلة والقطر بالنسبة لها .

ومسألة وجرد هذا الأثر أو عدم وجوده مسألة لم تتقرر بصفة نهائية حتى الآن (سنة ١٩٢٠) ويعمل الفلكيون بهمة عظيمة وحماس بالغ للوصول إلى حلها . وبالنسبة إلى ضآلة الآثر فى حالة الشمس نجد أنه من الصعب جداً أن نكوِّن رأياً عن وجوده فبينما يضع جرب وباكم (بون) كنتيجة لقياساتها شخصياً وقياسات أفرشد وشوارتز تشيلد على الحزم السيانورية وجود هذا الأثر فوق كل شك نجد علماء آخرون على الأخص سانجون قد انتهوا إلى الرأى المضاد تبعاً لقياساتهم .

إن متوسط انتقالات الخطوط الطيفية نحو الجزء الأقل حيوداً من الطيف تكشف عنه بكل تأكيد الأبحاث الإحصائية على النجوم الثابتة ولكن لا يسمح لنا إلى الآن فحص المدلولات الممكن الحصول عليها بإتخاذ قرار محدد فيما إذا كانت هذه الانتقالات واجبا إرجاعها فى الحقيقة إلى تأثير الجاذبية أم لا . ولقد جمعت نتائج الأرصاد معا ونوقشت

بالتفصيل من وجهة نظر المسألة التى شغلت انتباهنا هنا فى بحث عميق قام به فرويندلش[١] .

على أى حال سوف نصل إلى قرار حاسم فى السنوات القليلة القادمة فإذا كـان انتقال خطوط الطيـف نحو الأحمـر بتأثير الجـهد الجاذبى غـير موجود فـإن نظرية النسبيـة تصبح مرفوضـة لا محل لقبولهـا أما إذا كان سبب هذا الانتقـال يمكن إرجاعه بالتحديد إلى الجهـد الجاذبى فإن دراسة هذا الانتقال ستمدنا بمعلومات قيمة عن كتلة الأجرام السماوية .

ملحوظة : لقد أثبت آدمز انتقـال خطوط الطيف نحو الطرف الآحمر فى سنة ١٩٢٤ بأرصـاد قام بها على سـيريس شـديد الكثافة حـيث تبلغ كثافته ثلاثين ضعفاً لكثافة الشـمس .

---

(١) انظر البحث :

زZur Prüfung der allgemeinen Relativitats Theorieس

فى مجلة :

Julius Springer Ber-ز ٢٥٠ , Naturwissenschaften 1919 No. 35, p.

الملحق الرابع

بناء الفضاء تبعاً لنظرية النسبية العامة

(تكملة الفصل الثانى والثلاثين)

لقد تقدمت معلوماتنا عن الفضاء العام (المشكلة الكونية) منذ صدور الطبعة الأولى من هذا الكتاب تقدماً هاماً يجدر ذكره حتى فى عرض مبسط للموضوع .

لقد كانت نظرتى الأولى للموضوع تستند إلى فرضين :

١ - هناك متوسط كثافة للمادة فى كل الفضاء وهو واحد في جميع أجزاء الفضاء يختلف مقداره عن الصفر .

٢ - اتساع الفضاء («نصف قطره») مستقل عن الزمن .

ولقد تبين أن هذين الفرضين منسجمان تبعاً لنظرية النسبية العامة ولكن بعد إضافة حد افتراضى إلى معادلات المجال . وهو حد لم تكن النظرية فى حد ذاتها فى احتياج إليه كما لم يكن يبدو من وجهة النظر النظرية طبيعياً (« الحد الكونى فى معادلات المجال ») .

أما الفرض الثانى فقد بدا لى أنه لا مفر منه فى ذلك الحين لأننى

كنت اظن ان المرء يتعرض لفيض من المزاعم لا نهاية له لو ابتعد عنه وأسقطه .

ومع ذلك فقد كان فريدمان الرياضي الروسي قد أوضح في العشرينات من هذا القرن أن فرضاً آخر كان طبيعياً من زاوية نظرية بحتة. لقد أدرك أنه كان ممكناً الاحتفاظ بالفرض الأول دون إدخال الحد الكوني المتكلف في معادلات المجال للجاذبية إذا كنا على استعداد للتخلي عن الفرض الثاني . أى أن معادلات المجال الأصلية تقبل حلا يتوقف فيه « نصف قطر العالم » على الزمن (تمدد الفضاء) وبهذا المعنى يمكن القول مع فريدمان إن نظريته تستوجب تمدد الفضاء .

لم تمض بعد ذلك سوى سنوات قلائل حتى استطاع هبل أثناء بحث خاص عن سدم نهر المجرة أن يوضح أن خطوط الطيف يظهر فيها انتقال نحو الأحمر يزداد بانتظام مع بعد هذه السدم ، ولا يمكن تفسير هذا الأمر تبعاً لمعلوماتنا الراهنة إلا وفق مبدأ دوبلر أى باعتباره حركة تمدد بين النجوم كما تستوجبه - تبعا لفريدمان معدلات الجاذبية . وعلى ذلك يعتبر اكتشاف هبل تأييداً للنظرية ولو إلى حد ما ولو أنه ظهر تبعا لذلك أنه يثير مشكلة على وجه كبير من الغرابة .

إن تفسير انتقال خطوط الطيف نحو الأحمر الذى اكتشفه هبل فى سدم المجرة على أنه تمدد (وليس من السهل إنكار ذلك من الناحية النظرية) يؤدى بنا إلى الاعتقاد بأن بداية هذا التمدد كانت منذ $١٠^{٩}$ سنة

فقط بينما يبدو تبعاً للفلك الفيزيائى أن تكوين النجوم والمجموعات النجمية استغرق وقتا أطول من ذلك بكثير وليس هناك بارقة أمل تشير إلى الطريقة التى ستتغلب بها على النشوز الفريد .

وأود فوق ذلك أن أبدى ملحوظة بأن نظرية الفضاء المتمدد هى والمدلولات التجريبية للفلك معاً لا تسمحان بإتخاذ قرار حول طابع نهاية أولا نهاية الفضاء (ثلاثى الأبعاد) بينما يخضع الفرض «الاستاتيكى» الأصلى للفضاء لإغلاق الفضاء (نهائيته) .

الملحق الخامس
النسبية ومشكلة الفضاء

من سمات فيزياء نيوتن البارزة أنه كان عليها أن تعطى كلا من الزمان والمكان وجوداً مستقلا وحقيقياً مثل ما للمادة لأن فكرة العجلة تظهر فى قانون نيوتن للحركة . ولكن العجلة لا يمكن أن تشير فى هذه النظرية إلا إلى العجلة بالنسبة إلى المكان .

وهكذا لا مندوحة من اعتبار المكان بالنسبة إلى نيوتن كما لو كان ساكناً أو على الأقل ليس معجلا حتى يمكن لنا أن نعتبر العجلة التى تظهر فى قانون الحركة مقداراً له معنى ما . وينطبق هذا أيضاً على الزمن الذى يدخل طبعاً هو الآخر فى تصور العجلة . ولقد شعر نيوتن نفسه وأكثر معاصريه تحرراً بأكبر الحرج من وجوب إعطاء كل من « المكان » نفسه وكذلك حالته من الحركة واقعاً فيزيائيا . ولكنه لم يكن هناك بد من ذلك فى تلك الأيام لكى تحتفظ الميكانيكا بمعنى واضح .

إنه حقاً ضرب من المغالاة والتعنت أن نعطى المكان عموماً حقيقة فيزيائية خصوصاً الفضاء الفارغ ولهذا كان الفلاسفة منذ أقدم العصور يرفضون مراراً وتكراراً مثل هذا الفرض . خذ مثلا ديكارت لقد كان يرى

أن الفضاء صنو للإمتداد والامتداد متعلق بالأجسام وعلى ذلك لا يمكن أن يكون هناك فضاء دون أجسام أى أنه ليس هناك فضاء فارغ » وضعف هذه الحجة يكمن أصلا فيمايلى : مـن المؤكد أن التصور امتداد تولد أصلا عن تجاربنا فى إبعاد أو تقـريب الأجسام الجاسئة من بعضـها البعض ولكنا لا نسـتطيع اسـتناداً إلى هذا أن نقطع أن تصـور الامـتداد لا تؤيده حـالات أخرى لم تشتـرك بذاتها فى تكوينه . ومثل هذا التوسـيع فى التصورات يمكن أن تبرره فائدته وجدواه فى تفسير النتائج التجريبية .

من هذا نرى أن التأكيد بأن الامتداد وقف على الأجسام تأكيد فى حد ذاته لا أساس له من الصحة . ومع ذلك سـوف نرى فيما بعد أن نظرية النسبيـة العامة تذهب تقريباً إلى مـا ذهب إليه ديكارت . إن الدافع الذى حدا بديكارت إلى اتخاذ هذا الرأى الخلاب جـداً هو شعوره بأنه لا يجوز أن نعطى جزافاً حقيقة لشئ مثل الفضاء لا يمكن « مكابدته مباشرة»[1] .

إن الأصل السـيكولوجى لفكرة الفضـاء أو للزومهـا بعيـدا جداً عن الوضوح ولو أننا كثيراً ما نظن انسـياقاً مع مألوف عاداتنا الفكرية أنه أمر واضح للعـيان . لقد كـان القدامى من علمـاء الهندسة يعـالجون أشـياء تصورية (الخط المسـتقيم والنقط والسطح) لا الفضـاء بالذات . إنما حدث هذا بعد ذلك فى الهندسة التحليلية . وفكرة الفضاء برغم هذا فكرة توحى بهـا إيحاء قـوياً بعض التجـارب البدائيـة البسـيطة . تخـيل أننا صنعنا

(١) يجب أن يؤخذ هذا التغيير على علاته .

صندوقاً . أننا نستطيع أن نرتب الأشياء بطريقة معينة داخل الصندوق حتى يمتلىء وإمكان مثل هذه الترتيبات أمر يتعلق بالشيء المادى الصندوق . إنه شيء ملازم للصندوق وإنه الفضاء الذى يحتويه الصندوق وهو شيء يختلف باختلاف الصناديق . شيء يعتقد طبعاً أنه مستقل عن كون الصندوق به أو ليس به إطلاقاً فى أية لحظة أى أجسام وعندما لا يكون فى الصندوق أشياء يبدو فضاؤه « فارغا» .

وإلى هنا ارتبط تصورنا للفضاء بالصندوق ولكنه واضح مع ذلك أن إمكانيات التخزين التى تكوّن فضاء الصندوق مستقلة تماماً عن سمك جوانبه . أليس ممكنا أن نضغط هذه الجدران ونختزلها إلى أن تختفى من الوجود تماماً ومع ذلك يتبقى الفضاء الذى كانت تضمه هذه الجدران ؟ لا مراء فى أن عملية التحديد هذه أمر طبيعى جداً وهكذا يتبقى لدينا فكريا الفضاء - دون ما حاجة إلى الصندوق - شيئاً واضحاً من تلقاء نفسه ، ولو أنه يبدو لنا وهماً إذا ما غاب عنا أصل هذا التصور . وهذا يفسر لماذا كره ديكارت أن يعتبر الفضاء شيئاً مستقلا عن الأجسام المادية أعنى شيئاً يمكن أن يوجد دون المادة[1] (وفى نفس الوقت لا يمنع هذا ديكارت من

---

(١) حاول كانت التخلص من هذه الورطة فأنكر موضوعية الفضاء ، ولكن هذا الأمر لا يمكن أخذه على محمل الجد فامكانيات التخزين فى الفضاء وداخل الصندوق وأن كانت ملازمة له لها نفس الوجود الموضوعى الذى للصندوق نفسه وللأجسام التى توضع فيه .

اعتبار الفضاء تصوراً أساسياً فى هندسته التحليلية) ولقد جرد اكتشاف وجود فراغ فى البارومتر الزئبقى آخر أنصار ديكارت من كل أسلحتهم ومع ذلك فلا سبيل إلى إنكار أنه حتى فى هذا الطور البدائى علق كثير من عدم الرضا والارتياب بتصور الفضاء أو بالفضاء على اعتباره شيئاً حقيقياً مستقلا .

إن الطرق التى يمكن تبعاً لها حشد الأجسام فى الفضاء (الصندوق) هى فى الحقيقة موضوع بحث الهندسة الإقليدية ثلاثية الأبعاد ولو أن بناءها البديهى يخدعنا إذ يجعلنا ننسى أنها تتعلق بمواقف يمكن تحقيقها .

والآن إذا كان تصور الفضاء قد نشأ على هذه الصورة فإنه يكون أصلا فى ضوء تجربة ملء الصندوق فضاءً « محدوداً » وعلى ذلك فهذا التحديد لا يبدو أساسيا لأنه واضح أنه يمكن دائماً تصور صندوق أكبر يمكن أن يحتوى الصندوق الأصغر وبهذه الطريقة يبدو الفضاء كشيء غير محدود .

ولن أحاول هنا تقصى نشأة تصورى الفضاء ثلاثى الأبعاد وطبيعته الإقليدية راجعاً بهما إلى تجارب بدائية نسبياً إنما أفضل على ذلك أن أستعرض من زوايا أخرى دور تصور الفضاء فى تقدم ونمو الفكر الفيزيائى .

إننا إذا وضعنا صندوقا صغيراً (ص) ساكناً نسبياً داخل صندوق

الفارغ ويصبح نفس الفضاء الذى يحويهما ملكاً مشاعاً لهما . وإذا كان (ص) متحركا بالنسبة إلى (صَ) يتعقد الأمر ويميل المرء إلى اعتبار (ص) يتضمن دائما نفس الفضاء ولكنه جزء متغير من فضاء (صَ) وعند ذلك يصبح ضرورياً أن يختص كل صندوق بفضائه الخاص باعتباره غير محدود وأن نفرض أن هذين الفضاءين يتحركان بالنسبة إلى بعضهما البعض .

ويبدو لنا الفضاء قبل أن نتمثل تماماً هذا التعقيد كأنه وسط غير محدود أو وعاء تهيم فيه الأجسام المادية سابحة . ولكن أصبح الآن لزاماً علينا أن نتذكر أن هناك عدداً لا حصر له من الفضاءات التى تتحرك بالنسبة إلى بعضها البعض . وتصور الفضاء باعتباره شىء موجود موضوعيا ومستقلا عن بقية الأشياء تصور يرجع إلى فكر ما قبل العلم بخلاف فكرة وجود عدد لا نهائى من الفضاءات تتحرك بالنسبة إلى بعضها البعض . فهذه الفكرة الأخيرة تفرض نفسها منطقياً ولكنها - وهذا أمر فى غاية الغرابة - لم تلعب أى دور هام حتى فى الفكر العلمى .

الآن وقد وضح أمامنا الأصل السيكولوجى لتصور المكان يحق لنا أن نتساءل : ما هو الأصل السيكولوجى لتصور الزمان . . . ؟ لاشك فى أن هذا التصور مرتبط بمسألة « التذكرة» كما هو مرتبط بالتمييز بين التجربة الحسية واستعادة ذكرى هذه التجربة . ومن المشكوك فيه فى حد ذاته أن يكون التمييز بين التجارب الحسية واستعادة ذكرى هذه التجارب (أو

التخيل البسيط لها) شيء قد أعطى لنا سيكولوجياً مباشرة . فكل منا قد عانى الشك فيما إذا كان قد كـابد فعلا إحساساً أو أنه حلم به فقط ومن المحتمل أن تكون القـدرة على التمييز بين هذين البـديلين نابعة من القدرة الخلاقة للمخ .

إننا نربط بين الـتجـربة و «الذكـرى» ونعـتـبـرها أسـبق بالمقـارنة «بالتجـارب الراهنة» وهذا مبدأ ترتيـبى ذهنى لذكريات التـجارب وإمكان تحقيق هذا المبدأ يعطينا التصور الذاتي للزمن أى ذلك التصور الذى يرجع إلى ترتيب تجارب الفرد .

ولكن ماذا نعنى بجـعل تصور الزمن موضـوعياً ؟ دعنا نتأمل مـثلا يوضح لنا ذلك . هب أن أحـداً من الناس أ (أنا) شاهد البـرق وأنه فى نفس الوقت شاهد سلوكـاً للشخص ب ينم عن ارتباطه بنفس تجـربته هو «مشـاهدة البرق» هكذا يشتـرك أ ، ب فى تجربة مشـاهدة البرق ، وعلى ذلك تتـولد عند أ فكرة أن أشخـاصـاً آخرين يشـتركـون معـه فى نفس التـجـربة وهـكذا تصبح مشـاهدة البرق بعـد أن كانت تجربة شـخصـية محضـة ، تجربة للآخرين (أو فى النهاية مجـرد تجربة ممكنة الوجود) على هذا النحو نجـد أن التفسـير «أنها تبرق» الذى وعـيناه أول الأمر كتـجربة شخصية قد أصبح الآن يفسـر أيضا على أنه حادثه (موضوعية) وهى بهذا الشكل مـثلٌ أو رمز لكل الحـوادث التى نعنيـها عند الكلام عن «العـالم الخارجى الحقيقى » .

لقد رأينا أننا مسوقون إلى أن نرتب تجاربنا ترتيباً زمنيا يجرى على هذا النحو : إذا كان (ب) متأخراً بالنسبة إلى (أ) ، (حـ) متأخرا بالنسبة إلى (ب) يكون (حـ) متأخراً بالنسبة إلى (أ) أيضاً (تتابع التجارب) ولكن ما هو وضع الحوادث التى ربطناها مع التجارب بهذا الخصوص . . . ؟ يبدو واضحاً لأول وهلة أن هناك ترتيباً زمنياً للحوادث يتفق مع الترتيب الزمنى للتجارب . لقد كان هذا هو المتبع بوجه عام على غير وعى إلى أن ظهرت فى الأفق شكوك خاصة[1] . وحتى نصل إلى فكرة العالم الموضوعى فلا نزال فى حاجة إلى تصور بناء آخر . إن الحادثة ليست محددة الموقع بالنسبة إلى الزمن فقط بل وبالنسبة إلى المكان أيضاً .

لقد حاولنا فيما تقدم من السطور أن نصف كيف يمكن أن نربط سيكولوجياً بين تصورات : المكان والزمن والحادثة من ناحية والتجارب من الناحية الأخرى . وهذه التصورات من ناحية المنطق ابتكارات حرة للعقل البشرى . إنها أدوات للفكر القصد منها ربط التجارب فيما بينها بصلة حتى يمكن أن نحصيها جيداً . ومحاولة إدراك الأصول التجريبية التى نبعت منها هذه التصورات الأساسية يجد ربها أن توضح لنا مدى تقيدنا بهذه التصورات وبهذا الشكل نصبح على بينه من مدى حريتنا التى يصعب علينا غالباً عند الاقتضاء استغلالها استغلالا معقولاً .

---

(١) فترتيب التجارب زمنيا تبعا للوسائل السمعية مثلا يمكن أن يختلف عن ترتيبها زمنيا تبعا للوسائل البصرية بحيث يتعذر تطابق التتابع الزمنى للحوادث مع التتابع الزمنى للتجارب .

ولا زال أمامنا اعتبار أساسى يجب إضافته إلى هذه الصورة وهو يتعلق بالأصل السيكولوجى لتصورات المكان - زمن - حادثة (وسنسميها بالاختصار شبه الفضائية على عكس التصورات من المحيط السيكولوجى) فلقد ربطنا الفضاء مع تجارب تستخدم الصناديق وترتيب الأجسام المادية فيها . وهكذا يفترض هذا التكوين لهذه التصورات سبق وجود تصور الأجسام المادية (أى الصناديق) وكذلك يلعب بنفس الطريقة الأشخاص الذين كان لزاما أن ندخلهم حتى يتكون التصور الموضوعى للزمن دور الأجسام المادية بهذا الخصوص ولذلك يبدو لى أن تكوين تصور الجسم المادى يجب أن يسبق تصوراتنا للمكان والزمان .

وكل هذه التصورات شبه الفضائية تتعلق فعلا بعصر ما قبل العلم جنبا إلى جنب مع تصورات من المجال النفسى مثل الألم والهدف والغرض . . . إلخ ولكنه من سمات الفكر فى الفيزياء كما هو من خصائص الفكر فى العلم الطبيعى عامة أن يسعى من حيث المبدأ ألا يلجأ إلا إلى التصورات « شبه الفضائية» وحدها ، وأن يجتهد فى التعبير بوساطتها عن كل العلاقات على شكل قوانين . فعالم الفيزياء يجتهد أن يرد الألوان والنغمات إلى اهتزازات كما يجتهد عالم الفسيولوجى فى رد الفكر والألم إلى عمليات عصبية بشكل يستبعد العنصر النفسى بذاته (من حيث هو عنصر نفسى) من سلسلة الاتصال السببية للوجود . وهكذا لا يتدخل هذا العنصر فى أى مكان كحلقة مستقلة فى الإرتباطات السببية .

ولاشك أن هذا الوضع الذى يعتـبر أن إمكان فـهم كل العـلاقات أمـر مرهون باستعمال التصورات «شبه الفضائية» وحدها هو من حيث المبدأ ما يقصـد التعـبير عنه هـذه الأيام «بالمادية» (طالما أن المادة قد فـقدت دورها كتصور أساسى) .

ولكن : لماذا كان علينا أن ندحرج الأفكار والتصورات الأساسية عن الفكر فى العلم الطبيعـى من علياء سمائها عند جبـال أولمب فى أحضان أفلاطـون محـاولين الكشف عن منبتـها الأرضى . . . ؟ لعل ذلـك كان أفضل وسيلة لتخليص هذه الأفكار وتحريرها من ربقة الطلسم الذى ضرب عليها . وهكذا تحقق حرية أكبر فى تكوين الأفكار والتصورات . والفضل الأكبر فـى ذلك يرجع إلى خالدى الذكر دافيـد هيوم وأرنست ماك فهـما اللذان سبقا الجميع إلى هذا الفهم الناقد .

لقد أخـذ العلم عن فكر مـا قبل العلم التـصورات فـضاء ، زمن ، والجسم المادى (مـع الحالة الخاصـة الهامـة «الجسم الجـاسىء» ، وحورها وجعلها أكثر دقة فأينعت وكـانت أولى ثمراتها المهمة هندسة إقليدس التى يجب أن لا تحجب صيـغتها البديهـية عن أعيننا منبتهـا التجريبى (إمكان إزاحة الأجسام عن بعـضها البعض أو رصها فوق بعـضها البعض) وعلى الأخص طبيـعة الفـضاء ثلاثية الأبعـاد وطابعه الإقليـدى فهـذا كله أيضا تجريبى الأصل . (يمكن ملؤه كله «بمكعبات » متشابهة البناء) .

وتسامى تصور الفضـاء كثيراً بعد أن اكتشـفنا أنه ليس هناك أجسام

تامة الجساءة فكل الأجسام مرنة إن قليلاً أو كثيراً وتتغير أحجامها تبعاً لتغيير درجة حرارتها أيضاً . وعلى ذلك فالإنشاءات التى يجب وصف تطابقاتها الممكنة بوساطة هندسة إقليدس لا يمكن تمثيلها بعيدا عن التصورات الفيزيائية . ولكن لما كانت الفيزياء آخر الأمر مضطرة إلى استخدام الهندسة فى إقامة تصوراتها فإن المضمون التجريبى للهندسة لا يمكن تقريره أو اختباره إلا فى إطار الفيزياء كلها .

ويجب أن لا يغيب عن بالنا فى هذا الخصوص الفكرة الذرية (الذريات) وتصورها عن القابلية للانقسام المحدد لأن الفضاءات ذات الامتداد دون الذرى لا يمكن قياسها . وتضطرنا الذريات أيضا إلى التخلى من حيث المبدأ عن فكرة السطوح المحددة تماماً واستاتيكياً والتى تحد الأجسام الصلبة . وليس هناك إذا راعينا الدقة قوانين دقيقة حتى على مستوى الحيز الكبير للتشكيلات الممكنة للأجسام الجاسئة التى تتلامس .

وعلى الرغم من هذا لم يفكر أحد فى التخلى عن تصور الفضاء لأنه كان يبدو مما لا يمكن الاستغناء عنه فى مجموع نظام العلم الطبيعى ، وكان ، مرضياً جداً . ولقد كان ماك فى القرن التاسع عشر هو الوحيد الذى فكر جدياً فى حذف تصور الفضاء . عندما فكر فى أن يستبدله بفكرة مجموع المسافات اللحظية بين كل النقط المادية (لقد حاول ذلك ابتغاء الوصول إلى فهم أكمل للقصور الذاتى) .

المجال :

يلعب الفضاء والزمن في ميكانيكا نيوتن دوراً مزدوجاً ، فهما أولا يؤديان دور الحامل أو الهيكل لما يحدث في الفيزياء والذي تلند إليه وصف الحوادث عن طريق إحداثيات المكان والزمن . وتعتبر المادة من حيث المبدأ مكونة من « نقط مادية » تكوّن حركاتها الحوادث الفيزيائية . وعندما تعتبر المادة ملتمرة البناء ، لا يكون ذلك إلا مؤقتا في تلك الحالات التي لا نريد أو لا نلتطيع أن نصف البناء الحبيبي . وفي هذه الحالة تعامل الأجزاء الصغيرة (عناصر الحجم) من المادة معاملة النقط المادية على الأقل طالما كنا نهتم بمجرد الحركات لا بالوقائع التي ليس ممكناً الآن ، أو لا فائدة ترجى من إسنادها للحركات (أي تغيرات درجة الحرارة أو العمليات الكيميائية) أما الدور الثاني للفضاء والزمن فقد كان يتلكص في أنهما «مجموعة قصورية» وكانت المجموعات القصورية تمتاز دائماً على كل مجموعات الإسناد الممكن تصورها بأن قانون القصور الذاتي صحيح بالنلبة لها .

والنقطة الأساسية في كل هذا هي أن الحقيقية الفيزيائية - ونعتبرها ملتقلة عن الأشكاص الذين يكابدونها - تبين أنها تتكون على الأقل من حيث المبدأ من المكان والزمن من ناحية والنقط المادية دائمة الوجود من الناحية الأخرى والتي تتحرك بالنلبة للزمن والفضاء . ويمكن التعبير بشكل عنيف عن فكرة الوجود الملتقل للزمن والمكان على هذا النحو .

لو كـان لزاماً أن تكـتفى المادة لبـقى الزمن والمكان وحدهمـا (كنوع من المرح للحوادث الفيزيائية) .

ولقد جاء تذليل هذه العـقبة نتيجة لتقـدم كان يبدو لأول وهلة عديم الصلة بمشكلة المكـان - زمن . وأعنى به ظهور «تـصور المجـال» وغايتـه الأخيرة هى أن يحل من حيث المبـدأ محل فكرة الجليم (النقطة المادية) . ولقد ظهـر تصور المجـال فى هيكل الفيـزياء الكلاسيكية عـلى أنه تصور مساعـد فـى الحالات التى عولجت فيهـا المـادة باعـتبارها متصـلا . مثال ذلك : عند معالجة توصيل الحـرارة فى جلم جاسىء توصف حالة الجلم بذكر درجـة الحرارة فى كل نقطة من نقطة عند كل لحظة مـحددة . وهذا يعنى رياضـياً أن درجـة الحرارة ء تصـور على أنه تعـبيـر رياضى (دالة) لإحداثيـات المكان والزمن ز (مجال درجـة الحرارة) ويمثل قـانون توصيل الحرارة على أنه علاقة محلية (معـادلة تفاضلية) تضم كل الحالات الخاصة لتوصيل الحرارة . ودرجة الحرارة هنا مثال بلـيط لتصور المجال فهى كمية (أو مركب كميات) تكون دالة للإحداثيات والزمن . وهناك مثال آخر هو وصف حركة اللائل . ففـى كل نقطة من نقطة توجد فى أية لحظة سرعة توصف كمـياً بمركباتهـا الثلاث بالنلبـة إلى محاور مـجموعة إحـداثيات (متجـه) ومركبات اللرعـة فى نقطة ما هنا أيضاً (مركـبات المجال) دوال للإحداثيات (س ، ص ، ش) والزمن ز .

ومن مميزات المجالات التى ذكرناها أنهـا تحدث فقط داخل كتلة ذات

وزن . وهى تستخدم فقط لوصف حـالة ما لهذه المادة . وتمشياً مع التطور التاريخى لتصـور المجال نجد أنه لا يمكن أن يوجد المجـال حيث لا توجد المادة . ولكن ظهـر فى الربع الأول من القـرن التـاسع عشـر أن ظواهر حركة الضوء والتداخل يمكن تفسيرها بوضـوح مذهل باعتبار الضوء مجال موجى يـشبه تمامـاً مجـال الاهتزاز الميكانيكـى فى جسم جـاسىء مرن . وهكذا نشـأت ضرورة إدخـال مجـال يمكن أيضاً أن يوجـد فى «الفضـاء الفارغ» فى غياب المادة ذات الوزن .

ولقد أدت بنا هـذه الحالة إلى موقف غـاية فى الإشكال . ذلك لأن تصور المجال فى أول ظهوره كان - تمشيا مع نشأته - مقصوراً على وصف حالات فى داخل الجسـم ذى الوزن ، وكان هذا يبدو مؤكداً بقـدر اقتناعنا بأن كل مجال يجب أن يعتبر حالة قـابلة للتفسير الميكانيكى ، وكان هذا الأمر يفترض مقدماً وجود المادة ولهـذا أصبحنا مضطرين حتى فى الفضاء الذى اعتبرناه حتى الآن خالياً إلى افتراض وجود شكل من المادة فى جميع أجزائه وسمى هذا الشكل الأثير .

ولقـد كـان تخلص تصـور المجـال من زعم ارتبـاطه بفكرة حـامل ميكانيكى حدثاً من أهم الأحداث سيكولوجـيا التى دفعت الفكر الفيزيائى إلى الأمام .

فقـد اتضح خلال النصف الثـانى من القرن التـاسع عشـر بوضوح متـزايد مرتبط من أبحاث فـراداى وماكسـويل أن التعـبير عن العـمليات

الكهرومغناطيسية فى حدود المجال أفضل كثيراً من التعبير عنَها على أساس التصورات الميكانيكية للنقط المادية . ولقد نجح ماكسويل بتطبيق فكرة المجال فى التنبؤ بوجود الأمواج الكهرومغناطيسية التى لم يكن تماثلها الأساسى مع أمواج الضوء موضع شك نظراً لأن سرعة كليهما واحدة . وتبعاً لهذا ابتلعت من حيث المبدأ الكهرباء الديناميكية علم البصريات ، وكان الأثر السيكولوجى لهذا التقدم الهائل هو أن اكتسب تصور المجال تدريجياً استقلالاً أكبر من مواجهة الهيكل المكينى للفيزياء الكلاسيكية .

ومع هذا فقد كان من المسلم به أول الأمر أن المجالات الكهرومغناطيسية يجب تفسيرها على اعتبارها حالات للأثير وحاول العلماء بكل همة ونشاط تفسير هذه الحالات ميكانيكياً . ولكن بعد أن تعثرت هذه المحاولات وباءت بالفشل بصورة مستمرة أخذ العلم يقلع تدريجياً عن هذه المحاولات . ولو أن الاقتناع بأن المجالات الكهرومغناطيسية لا مناص من اعتبارها حالات للأثير ظل باقيا . وكان هذا هو الموقف حتى مطلع هذا القرن .

ولقد قامت فى أعقاب نظرية الأثير هذه الأسئلة : كيف يسلك الأثير من وجهة النظر الميكانيكية بالنسبة إلى الأجسام ذات الوزن ؟ هل يلعب دوراً فى حركات الأجسام أم تظل أجزاؤه فى حالة سكون بالنسبة إلى بعضها البعض ؟ . ولقد أجريت تجارب فذة للإجابة على هذه الأسئلة

[illegible]

الثابتة تبعاً لحركة الأرض اللنوية و «أثر دوبلر» أى تأثير الحركة النلبية للنجوم الثابتة على تردد الضوء الذى يصل إلينا منها بالمقارنة بالترددات المعروفة للإرسال . ولقد استطاع هـ . أ لورنتز تفلير جميع هذه الأمور والتجارب ما عدا واحدة هى تجربة ميكللن - مورلى - على أساس أن الأثير لا يشترك فى حركة الأجلام ذات الوزن وأن أجزاءه لا تتحرك إطلاقاً بالنلبة إلى بعضها البعض . وهكذا ظهر الأثير كما لو كان تجليداً للفضاء اللاكن إطلاقاً . ولكن أبحاث لورنتز ذهبت إلى أبعد من ذلك فقد فلرت كل العمليات الكهرومغناطيلية والبصرية داخل المادة ذات الوزن والتى كانت معروفة فى ذلك الحين على أساس أن تأثير الأجلام ذات الوزن على المجال الكهربائى - والعكس - راجع إلى مجرد أن الجليمات التى تكون المادة تحمل شحنات كهربائية تشترك مع الجليمات فى الحركة . أما فيما يتعلق بتجربة ميكللن - مورلى فقد أوضح لورنتز أن نتيجتها لا تتعارض على الأقل مع نظرية الأثير اللاكن .

وعلى الرغم من هذه الإنتصارات الرائعة لم تكن حالة النظرية مرضية تماماً للأسباب التالية . أن الميكانيكا الكلاسيكية - وليس هناك شك فى أنها تتفق والواقع - كتقريب أول تعلمنا تكافؤ كل المجموعات القصورية أو «الفضاءات » القصورية لصياغة القوانين الطبيعية أو عدم تغير هذه القوانين عند الانتقال من مجموعة قصورية إلى أخرى. وتعلمنا

«التجارب» الكهرومغناطيلية والبصرية نفس الشيء بدقة فائقة فى حين أن أساس النظرية الكهرومغناطيلية يعلمنا أن مجموعة قصورية خاصة يجب أن تعطى الأفضلية وهى الأثير المضيء الساكن . وهذه النظرة التى انطوى عليها الأساس النظرى كانت غير مرضية إلى أبعد الحدود فهل هناك تعديل لهذا الأساس يجعل - كما فى الميكانيكا الكلاسيكية - تكافؤ المجموعات القصورية حقيقة واقعية (مبدأ النلبية الخاصة) . . . ؟

إن الجواب على هذا اللؤال هو نظرية النلبية الخاصة ، وتحتفظ من نظرية ماكلويل - لورنتز بفرض ثبوت سرعة انتقال الضوء فى الفضاء الخالى . وحتى يكون هناك توافق تام بين هذا وبين تكافؤ المجموعات القصورية (مبدأ النلبية الخاص) لابد من التكلى عن فكرة الطابع المطلق للآنية . وبالإضافة إلى ذلك لابد من تطبيق تحويلات لورنتز لإحداثيات المكان والزمن عند الانتقال من مجموعة قصورية إلى أخرى . إن كل مضمون النظرية النلبية الخاصة يتضمنه هذا الفرض : « جميع قوانين الطبيعة لا تتغير بالنلبة لتحويلات لورنتز» . وأهم ما فى هذا القيد هو أنه يحد قوانين الطبيعة الممكنة بصورة محددة واضحة المعالم .

والآن ما هو وضع نظرية النلبية الخاصة بالنلبة إلى مشكلة الفضاء . . . . ؟

أولاً يجب أن نحذر الرأى القائل بأن رباعية أبعاد الحقيقة أدخلت حديثاً لأول مرة بوساطة هذه النظرية فى الفيزياء فحتى فى الفيزياء

الكلاسيكية كانت الحادثة يحدد موقعها بأربعة أعداد . ثلاثة إحداثيات مكانية وإحداثى زمنى . وعلى ذلك كان مجموع الحوادث الفيزيائية موسداً فى متنوع مستمر رباعى الأبعاد ؛ ولكن هذا المتصل الرباعى الأبعاد ينقسم موضوعياً تبعاً للميكانيكا الكلاسيكية إلى زمن أحادى الأبعاد وإلى قطاعات مكانية ثلاثية الأبعاد . ويحتوى الفريق الأخير منها على الحوادث الآنية وهذا الانقسام واحد بالنسبة لكل المجموعات القصورية . وتزامن حادثتين معينتين بالنسبة إلى مجموعة قصورية واحدة يعنى آنية هاتين الحادثتين بالنسبة إلى كل مجموعات الإسناد القصورية . وهذا هو المعنى الذى نقصده عندما نقول إن الزمن فى الميكانيكا الكلاسيكية مطلق ولكن الزمن من وجهة نظر نظرية النسبية الخاصة ليس كذلك . صحيح أن جماع الحوادث الآنية مع حادثة مختارة قائم بالنسبة إلى مجموعة قصورية خاصة ولكن لم يعد مستقلا عن اختيار مجموعة الإسناد . إن المتصل الرباعى الأبعاد لم يعد الآن قابلا للانقسام موضوعياً إلى قطاعات كل منها يحوى حوادث آنية . إن « الآن» تفقد بالنسبة للعالم الذى هو امتداد فضائى ، معناها الموضوعى ولأجل هذا يجب اعتباز الزمن والمكان متصلا رباعى الأبعاد غير قابل للأنقسام موضوعياً . إذا كنا نريد أن نعبر عن مضمون العلاقات الموضوعية دون تعسفات اتفاقية غير ضرورية .

ولما كانت نظرية النسبية الخاصة قد أوضحت التكافؤ الفيزيائى لكل المجموعات القصورية فقد أثبتت أن فرض الأثير الساكن لا محل له .

وعلى ذلك أصبح ضرورياً أن نتخلى عن فكرة أن المجال الكهرومغناطيسى يجب أن يعتبر كمجرد حالة لحامل مادى . وهكذا دخل المجال من أوسع الأبواب وأصبح عنصراً لا يستغنى عنه فى الوصف الفيزيائى له نفس الأهمية التى لتصور المادة فى نظرية نيوتن .

لقد وجهنا جل اهتمامنا حتى الآن إلى الوقوف على أوجه التحوير والتعديل الذى أدخلته نظرية النسبية الخاصة على تصورى المكان والزمن . ودعنا الآن نلقى نظرة على العناصر التى نقلتها هذه النظرية عن الميكانيكا الكلاسيكية . هنا أيضا لا تكون القوانين الطبيعية صحيحة إلا إذا اتخذنا مجموعة قصورية أساساً لوصف الزمن مكان . إن مبدأ القصور ومبدأ ثبوت سرعة الضوء صحيحان بالنسبة إلى مجموعة قصورية فقط ، ولا يمكن أن تكون قوانين المجال أيضا صحيحة أو ذات معنى إلا بالنسبة إلى المجموعات القصورية فقط ، وهكذا كما فى الميكانيكا الكلاسيكية نجد أن المكان هنا أيضاً مركبة مستقلة فى تمثيل الحقيقة الفيزيائية فإذا تخيلنا زوال المادة والمجال بقى المكان القصورى أو على الأدق بقى هذا المكان والزمن الذى يتصل به . إن الفكرة السائدة عن البناء الرباعى الأبعاد (فضاء منكوفسكى) هو أنه حامل للمادة والمجال أما الفضاءات القصورية مع الأزمنة المتصلة بها فمجرد مجموعات إحداثية ممتازة تتصل أو تترابط معاً بوساطة تحويلات لورنتز الخطية . وحيث إنه لم يعد يوجد فى هذا البناء رباعى الأبعاد أى قطاع يمثل «الآن» موضوعياً فإن تصورى الحدوث

والصيرورة لم يتوقف أو يلغيا تماما ولكنهما تعقدا للغاية وعلى ذلك يبدو طبيعياً جداً أن نعتبر الحقيقة الفيزيائية وجوداً رباعى الأبعاد بدلا من اعتبارها كما فعلنا حتى الآن تطوراً لوجود ثلاثى الأبعاد .

وهذا الفضاء الجاسىء رباعى الأبعاد فى نظرية النسبية الخاصة هو إلى حد ما نظير رباعى الأبعاد لأثير لورنتز الجاسىء ثلاثى الأبعاد وبالنسبة إلى هذه النظرية أيضا نرى أن مايلى صحيح : إن وصف الحالات الفيزيائية يفترض أن المكان موجود من قبل وأن وجوده مستقل ، وهكذا نجد أنه حتى هذه النظرية لا تبدد ضيق ديكارت فيما يتعلق بالوجود المستقل أو «الأوّلى» «حقا للفضاء الفارغ» إن الهدف الحقيقى للمناقشة الأولية التى قدمناها هنا هو أن نوضح إلى أى مدى تغلبت نظرية النسبية العامة على هذه الشكوك .

تصور الفضاء فى نظرية النسبية العامة

لقد نشأت هذه النظرية أصلا من محاولة لفهم تساوى الكتلة القصورية والكتلة الجاذبية . والآن دعنا نبدأ من مجموعة قصورية س١ فضاؤها من وجهة النظر الفيزيائية فارغ أو بعبارة أخرى لا يواجه فى الجزء من الفضاء محل الاعتبار أية مادة (بالمعنى المعتاد) ولا أى مجال (بالمعنى المقصود فى نظرية النسبية الخاصة) وهب أن هناك بالنسبة إلى س١ مجموعة إسناد أخرى س٢ تتحرك بعجلة منتظمة . وعلى ذلك لا تكون س٢ بهذا الشكل مجموعة قصورية فبالنسبة إلى س٢ سوف تتحرك

كل كتلة اختبارية بعجلة مستقلة عن طبيعتها الفزيائية والكيمائية وعلى ذلك يكون هناك بالنسبة إلى س٢ حالة هى على الأقل تقريب أوّل إلى مجال الجاذبية . وهكذا يكون التصور التالى متفقاً مع الوقائع المشاهدة : إن س٢ تكافىء أيضا « مجموعة قصورية» ولكن يوجد بالنسبة لها مجال جاذبى (متجانس) (لا داعى للتعرض لمصدره هنا) وهكذا تفقد المجموعة القصورية مغزاها الموضوعى عندما يتدخل المجال الجاذبى فى هيكل الموضوع إذا سلمنا بأن «مبدأ التكافؤ» هذا يمكن أن يمتد إلى أية حركة نسبية كانت لمجموعة الإسناد . إننا إذا استطعنا أن نضع نظرية متماسكة على أساس هذه الأفكار فإنها ستتفق تلقائيا مع حقيقة تساوى الكتلة الجاذبية والكتلة القصورية وهى حقيقة تؤيدها التجربة بقوة .

ومن وجهة النظر رباعية الأبعاد يناظر الانتقال من س١ إلى س٢ تحويلا لا خطيا للإحداثيات الأربعة وهنا يواجهنا هذا السؤال : أى أنواع التحويلات الخطية هو المسموح به ؟ أو كيف يمكن تعميم تحويل لورنتز. . . ؟ وللإجابة على هذه السؤال يعتبر ما يلى حاسماً :

إننا نخص المجموعة القصورية فى النظرية الأسبق بهذه الخاصية تقاس الفروق بين الإحداثيات بقضبان القياس الجاسئة الثابتة وتقاس الفروق فى الزمن بالساعات الساكنة . وأول هذين الفرضين يكمله فرض آخر ينص على أن نظريات إقليدس عن الأطوال تنطبق على عمليات القياس بالقضبان الساكنة . ونستطيع أن نستدل بسهولة من نتائج نظرية

النلبية الخاصة على أن هذا التفلير السفيزيائى المباشر للإحداثيات يعتبر مفقوداً بالنلبة إلى مجموعة الإسناد س$_2$ التى تتحرك بعجلة بالنلبة إلى المجموعة س$_1$. ولكن إذا كان هذا هو الوضع فإن الإحداثيات الآن لا تعبر إلا عن نظام أو رتبة مماسة أو استمرار الفضاء ، وعلى ذلك أيضا تعبر عن الرتبة البعدية للفضاء ولكنها لا تعبر عن أية خاصية من خواصه القياسية . وهكذا نجد أنفلنا ملاقين إلى أن نمد التحويلات إلى تحويلات تحكمية ملتمرة[1] وهذا يلتوجب المبدأ العام للنلبية :

« يجب أن تكون القوانين الطبيعية - متعدية التغير مع التحويلات التحكمية الملتمرة للإحداثيات » وهذا المطلب (مرتبطاً مع مطلب توفر أكبر بلاطة منطقية ممكنة للقوانين يحد القوانين الطبيعية العامة محل الاعتبار بأقوى مما كان فى مبدأ النلبية الخاصة .

وتقوم هذه السلللة من الأفكار أساسا على اعتبار المجال تصوراً ملتقلا لأن الأحوال اللائدة بالنلبة إلى س$_2$ تفلر على أنها مجال جاذبى دون أن تثار مـلألة وجود الكتل التى ينشأ عنها هذا المجال . وبفضل سلللة الأفكار هذه يمكن أيضاً أن نقف على سبب كون قوانين المجال الجاذبى البحت أقوى من حيث الاتصال المباشر بفكرة النلبسية العامة من قوانين المجالات التى من نوع عام (عندما يكون مثلا هناك مجال كهرومغناطيلى) .

---

(١) قد تفى طريقة التعبير غير الدقيقة هذه بالغرض المطلوب هنا .

ولدينا سند قـوى إذ نفرض أن فضـاء منكوفلكى الخـالى من المجال يمثل حالة خاصة ممكنة فى القانون الطبيعى بل إنها فى الحقيقة أبلط حالة خاصة يمكن تصورها . ويتميز مـثل هذا الفضاء من حيث طابعه القياسى بأن $ء س_{١}^{٢} + ء س_{٢}^{٢} + ء س_{٣}^{٢}$ هو مربع الفـترة المكانية - مقـيلاً بوحدة القياس - بين نقطتين متقاربـتين إلى ما لانهاية من قطاع ملتعرض لشبه فضاء ثلاثى الأبعاد (نظرية فيثاغورث) بينما $ء س_{٤}$ هو الفترة الزمنية - مقيـلا بقياس مناسب للزمـن - بين حادثتين تشتركـان فى الإحداثيات ($س_{١}$ ، $س_{٢}$ ، $س_{٣}$) ومعنى هذا كله ببـلاطة هو أن مغزى موضـوعياً قياسياً قد أعطى للكمية :

$$ء ف^{٢} = ء س_{١}^{٢} + ء س_{٢}^{٢} + ء س_{٣}^{٢} - ء س_{٤}^{٢} \qquad (١)$$

كما اتضح ذلك من قـبل بملاعدة تحويلات لورنتـز ويقابل هذا الأمر رياضياً شرط كون $ء ف^{٢}$ لا متغير بالنلبة إلى تحويلات لورنتز .

والآن إذا أخضعنا وفقاً للمبدأ العام للنلبية هذا الفضاء (انظر المعادلة (١)) لتحويل تحـكمى ملتمر للإحـداثيات عندئذ يعبر عـن الكمية ذات المغزى الموضوعى ء ف فى مجموعة الإحداثيات الجديدة بالعلاقة .

$$ء ف^{٢} = ح_{م ق}\, ء س_{م}\, ء س_{ق} \qquad (١ أ)$$

التى يجب أن تتكامل إلى ما فوق الأسس م ، ق تحل التوافيق ١١

١٢ . . . إلى ٤٤ وليست الحدود $ح_{م ق}$ فى هذه الحالة ثوابتاً بل دوال للإحداثيات يحددها التحويل التحكمى المختار . ومع ذلك فليست الحدود $ح_{م ق}$ دوالا تحكمية للإحداثيات الجديدة ولكنها مجرد دوال من نوع يجعل شكل المعادلة (١ أ) من الممكن إعادة تحويله إلى شكل المعادلة (١) بوساطة تحويل مستمر للإحداثيات الأربعة وحتى يمكن أن يحدث هذا يجب أن تحقق الدوال $ح_{م ق}$ معادلات عامة معينة شرطية متعدية التغير اشتقها ريمان منذ أكثر من نصف قرن قبل مجيء نظرية النسبية (شرط ريمان) وتبعاً لمبدأ التكافؤ نصف المعادلة (١ أ) بشكل متعدى التغير عام مجال جاذبى من نوع خاص عندما تحقق الدوال $ح_{م ق}$ شرط ريمان .

تبعا لما تقدم نجد أن قانون المجال الجاذبى البحت يجب أن يتحقق عندما يتحقق شرط ريمان ولكنه لابد أن يكون أضعف وأقل تعقيداً من شرط ريمان . وبهذه الطريقة يتحدد تماماً عملياً قانون المجال البحت ولن نقدم هنا مبررات هذه النتيجة تفصيلا (خطوات الوصول إليها) .

إننا الآن فى وضع يسمح لنا أن نرى إلى أى مدى يحوّر الانتقال إلى نظرية النسبية العامة تصور الفضاء . لقد كان للفضاء (الزمكان) وفقا للميكانيكا الكلاسيكية ونظرية النسبية الخاصة وجوداً مستقلا عن المادة والمجال . وحتى يمكن أن نقوم بأى وصف لذاك الذى يملاء الفضاء ويعتمد على الإحداثيات يجب أن ننظر فوراً إلى الزمكان أو المجموعة

القصورية بخواصها القياسية على اعتباره موجوداً وإلا كان وصف « ذاك الذى يملأ الفضاء » لا معنى له[١] . ولكن تبعا لنظرية النسبية العامة من الناحية الأخرى ليس للفضاء فى مواجهة « ما يملأ الفضاء» الذى يعتمد على الإحداثيات وجوداً مستقلا . وهكذا يمكن أن يوصف مجال جاذبى بحت فى حدود حم ق (كدوال للإحداثيات) يحل معادلات الجاذبية : إننا إذا تصورنا أن المجال الجاذبى أى الدوال حم ق قد أزيل فإنه لا يتبقى هناك فضاء من النوع (١) بل لا شىء على الإطلاق ولا « فضاء طوبولوجى » أيضا لأن الدوال حم ق لا تصف المجال وحده فقط ولكنها تصف فى نفس الوقت الخواص البنائية الطبولوجية القياسية للمتنوع . وفضاء من النوع (١) ليس من زاوية نظرية النسبية العامة فضاء بدون مجال بل حالة خاصة من فضاء حم ق ليس لها فى حد ذاتها معنى موضوعياً - لها قيم لا تعتمد على الإحداثيات - فليس هناك شىء من نوع الفضاء الخالى أى فضاء بدون مجال . أن الزمكان لا يدعى لنفسه وجوداً بذاته بل كمجرد صفة بنائية للمجال .

وهكذا لم يكن ديكارت بعيداً عن الصواب حينما اعتقد أنه يجب استبعاد وجود فضاء فارغ . إن هذه الفكرة تبدو حقاً شديدة السخف طالما أننا لا نرى الحقيقة الفيزيائية إلا فى الأجسام ذات الوزن . ولقد رأينا أننا

---

(١) إذا تخلينا أن ما يملأ الفضاء » (أى المجال) قد أزيل يتبقى لنا الفضاء المترى (القياسى) المتفق مع (١) الذى يمكن أن يحدد السلوك القصورى لجسم اختبار يوضع فيه .

لكى ندرك تماما اللب الحقيقى لفكرة ديكارت وكنهها استوجب الأمر أن نلجأ إلى فكرة المجال كممثل للحقيقة مرتبطة مع مبدأ النسبية العامة إذ ليس هناك مكان « خال من المجال» .

النظرية المعممة للجاذبية

وعلى ذلك أصبحت نظرية المجال الجاذبى البحت على أساس النظرية النسبية العامة فى متناول اليد لأننا نستطيع الاطمئنان إلى أن فضاء منكوفسكى الخالى من المجال المتفق قياساً مع (أ) بحيث أن يحقق القوانين العامة للمجال . ومن هذه الحالة الخاصة نحصل على قانون الجاذبية عن طريق تعميم خال عملياً من التحكم والخطوات التالية للنظرية لا يحددها بصورة لا نزاع فيها المبدأ للنسبية . لقد تمت عدة محاولات فى اتجاهات مختلفة خلال عشرات السنين القليلة الأخيرة وتشترك كل هذه المحاولات فى اعتبار الحقيقة الفيزيائية مجالا بل وأكثر من ذلك مجالا هو تعميم للمجال الجاذبى يكون فيه قانون المجال بل وأكثر من ذلك مجالا هو تعميم للمجال الجاذبى يكون فيه قانون المجال تعميماً لقانون المجال الجاذبى البحت . وبعد تمحيص طويل أعتقد أنى قد أهتديت الآن[١] إلى

---

(١) يمكن تصوير التعميم كمايلى : ان المجال الجاذبى البحت حسب اشتقاقه من فضاء منكوفسكى الخالى له خاصية التماثل التى تعبر عنها : $ح_{٢}ن$: ح ن م ($ح_{١٢} = ح_{٢١}$ ..... إلخ) والمجال المعمم من نفس النوع ولكن بدون خاصية التماثل هذه واشتقاق قانون المجال مماثل تماما لاشتقاق الحالة الخاصة للجذب البحت .

الصيغة الطبيعية جداً لهذا التعميم ولكنى لم أستطع حتى الآن أن أقف على حقيقة ما إذا كان هذا القانون المعمم يقوى على الصمود أمام وقائع التجربة أم لا .

ومسألة قانون المجال الخاص ثانوية بالنسبة للاعتبارات العامة السابقة فالسؤال الرئيسى الآن هو : **هل يمكن أن تصل بنا نظرية مجال من النوع الذى نتطلع إليه هنا إلى الهدف على الإطلاق ؟** ونعنى بالهدف نظرية تصف وصفاً كاملاً الحقيقة الفزيائية بما فيها الفضاء رباعى الأبعاد على اعتبارها مجالا . والجيل الحالى من علماء الفيزياء يميلون إلى الإجابة بالنفى على هذا السؤال حيث يعتقدون وفقاً للشكل الراهن لنظرية الكم أن حالة أية مجموعة فيزيائية ما لا يمكن أن تحدد مباشرة بل بطريق غير مباشر فقط بوساطة النص الإحصائى لنتائج القياس الممكن إجراؤها على المجموعة ويسود الاعتقاد بأن ازدواج الطبيعة الذى تؤكده التجارب (البناء الجسيمى والبناء الموجى) لا يمكن إدراك كنهة إلا بإضعاف تصور الحقيقة . وأعتقد أنه لا مبرر الآن مع معلوماتنا الراهنة لمثل هذا الإنكار النظرى البعيد الأثر وأنه يجدر بنا ألا نقلع عن متابعة المضى فى الطريق الذى مهدته أمامنا نظرية المجال النسبية حتى نهايته .

الفهرس

الجزء الأول

نظرية النسبية الخاصة

الموضـــــوع		الصفحة

الجزء الثاني

نظرية النسبية العامة

الموضــــوع			الصفحة

الموضـــــوع			الصفحة

الجزء الثالث

تأملات فى الكون ككل

الملاحق

الموضـــــوع			الصفحة

